

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR**

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE**

Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares

**ESTUDO DE LOCALIZAÇÃO DE USINA SOLAR
TERMOELÉTRICA NO ESTADO DE PERNAMBUCO**

VERÔNICA WILMA BEZERRA AZEVÊDO

Orientador: Prof. Dr. Chigueru Tiba

Coorientador: Prof. Dr. Ana Lúcia B. Candeias

Recife, PE

Janeiro, 2016

VERÔNICA WILMA BEZERRA AZEVÊDO

**ESTUDO DE LOCALIZAÇÃO DE USINA SOLAR
TERMOELÉTRICA NO ESTADO DE PERNAMBUCO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Tecnologias Energéticas e Nucleares para
obtenção do título de Doutor em Ciências, Área
de Concentração: Fontes Renováveis de
Energia.

Orientador: Prof. Dr. Chigueru Tiba

Coorientador: Prof. Dr. Ana Lúcia B. Candeias

Recife, PE

Janeiro, 2016

Catálogo na fonte
Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4 / 1502

A994e Azevêdo, Verônica Wilma Bezerra.

Estudo de localização de usina solar termoelétrica no estado de Pernambuco. / Verônica Wilma Bezerra Azevêdo. - Recife: O Autor, 2016.

239 f. : il., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Chigueru Tiba.

Coorientadora: Profa. Dra. Ana Lúcia Bezerra Candeias.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2016.

Inclui referências bibliográficas, apêndices e anexos.

1. Energia solar. 2. Usina solar termoelétrica. 3. Estudos de localização. 4. Sistemas de informação geográfica. 5. Análise de decisão multicritério. 6. LCOE. I. Tiba, Chigueru, orientador. II. Candeias, Ana Lúcia Bezerra, coorientadora. III. Título.

UFPE

CDD 621.47 (21. ed.)

BDEN/2016-04

ESTUDO DE LOCALIZAÇÃO DE USINA SOLAR TERMOELÉTRICA NO ESTADO DE PERNAMBUCO

Verônica Wilma Bezerra Azevêdo

APROVADA EM: 29.01.2016

ORIENTADOR : Prof. Dr. Chigueru Tiba

CO-ORIENTADORA : Profa. Dra. Ana Lúcia Bezerra Candeias

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Chigueru Tiba – DEN/UFPE

Prof. Dr. Naum Fraidenraich – DEN/UFPE

Profa. Dra. Elielza Moura de Souza Barbosa – DEN/UFPE

**Profa. Dra. Lucilene Antunes Correia Marques de Sá –
DECART/UFPE**

Prof. Dr. José Bione de Melo Filho – UPE

Visto e permitida a impressão

Coordenador(a) do PROTEN/DEN/UFPE

Ao meu pai José Ricardo Azevedo e à minha mãe Severina Maria Bezerra Azevedo que me deram a vida e me ensinaram a seguir adiante sempre.

As minhas tias Severina Bezerra da Conceição (tia Bia) e Maria Rozendo Bezerra (tia Maria) que sempre estiveram ao meu lado, norteando com todo o carinho e amor.

A meu esposo Alison Galdino por todo o afeto, amor, companheirismo e respeito.

À minha filha Maria Clara, minha fonte de inspiração e minha vida.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Chigueru Tiba e a Professora Ana Lúcia Bezerra Candeias por todas as contribuições, discussões, dedicação e estímulo à Pesquisa;

Agradeço aos Professores Naum Fraidenraich, Elielza Moura de Souza Barbosa e Lucilene Antunes Correia Marques de Sá pelo acompanhamento desta Pesquisa e por todas as contribuições dadas;

Agradeço aos Professores Carlos Costa Dantas, José Bione de Melo Filho e José Luiz Portugal pela participação na Comissão Examinadora da Defesa desta Tese;

Agradeço ao Alison Galdino de Oliveira Silva, engenheiro cartógrafo e meu esposo, pelo amor, atenção, companheirismo, estímulo e por toda a contribuição técnica dada para o desenvolvimento desta Pesquisa;

Agradeço ao José Anderson Estefano S. de Souza, engenheiro cartógrafo e amigo, pela atenção e contribuição técnica dada a esta Pesquisa;

Agradeço aos meus familiares, especialmente aos meus pais José Ricardo Azevedo e Severina Maria Bezerra Azevedo e as minhas tias Severina Bezerra da Conceição (tia Bia) e Maria Bezerra da Silva (tia Maria), por todo o carinho e apoio dado em todos os momentos de minha vida;

Agradeço a CAPES pelo incentivo concedido por meio da bolsa de estudos;

Ao Departamento de Energia Nuclear pela oportunidade do Doutorado;

A Universidade Federal de Pernambuco;

A todos que contribuíram.

RESUMO

Notadamente nos últimos anos, a geração de eletricidade a partir de fontes renováveis de energia tem mostrado contínuo aumento que está relacionado, sobretudo, às preocupações com as variações climáticas, à dependência dos combustíveis fósseis e à necessidade de suprir a geração de energia elétrica com recursos que produzam menos impactos ao meio ambiente. A capacidade instalada da energia renovável no mundo, que foi de 800GW em 2004, alcançou 1.712GW em 2014 e a participação na matriz energética global também aumentou, atingindo o percentual de 22,8% em 2014. O Brasil possui uma matriz energética predominantemente renovável. Somente em 2014, aproximadamente 74,6% da eletricidade gerada procedeu das fontes renováveis de energia. O percentual restante (25,4%) proveio dos combustíveis fósseis e das fontes nucleares. Mas, muito embora o País possua uma matriz energética tipicamente renovável, nota-se que o principal sistema de geração é o aproveitamento hidráulico, que é bem vulnerável às variações climáticas globais e pode apresentar, em função disso, redução de sua capacidade instalada em longo prazo. Visando contribuir para a diversificação da matriz energética brasileira, esta pesquisa apresenta dois métodos distintos e macroespaciais para auxiliar a seleção de áreas potenciais para a inserção de usinas solares termoeletricas: o Método baseado no Processo Analítico Hierárquico, que trata o problema da localização sob uma organização hierárquica de critérios, como pressupõe os axiomas do Método AHP; e o Método do Custo de Produção de Eletricidade, que define os locais aptos em função do custo nivelado da eletricidade (LCOE – *Levelised Cost of Electricity*). Ambas as metodologias foram aplicadas para Pernambuco, localizado na região Nordeste do Brasil, e considerou a implantação de usinas de coletores parabólicos de 80MWe, tipo SEGS, operando somente em modo solar, sem armazenadores térmicos. Com base nas análises realizadas, confirmou-se que Pernambuco apresenta grande potencial para a implantação de usinas solares, principalmente no Sertão Pernambucano, onde foram encontrados os ambientes mais favoráveis à instalação. Na aplicação do Método AHP, por exemplo, o Sertão apresentou alto potencial de instalação em todos os cenários avaliados, inclusive no cenário Ponto de Partida, onde os pesos não foram considerados. No Método do Custo de Produção de Eletricidade, o Sertão também mostrou alto potencial de instalação uma vez que os custos de geração de energia elétrica encontrados foram os menores do estado (da ordem de R\$ 337,16/MWh). Este custo é elevado quando comparado com o preço da eletricidade gerada pela fonte hidráulica no país (R\$ 182,09/MWh), por exemplo, mas estão em conformidade quanto ao esperado para sua inserção no mercado brasileiro. De modo geral, as abordagens apresentadas se mostraram muito consistentes e revelaram um potencial bastante promissor para o desenvolvimento da tecnologia em Pernambuco. Este potencial deverá ser avaliado detalhadamente e incluir a medição local da radiação solar por pelo menos cinco anos.

Palavras-chave: Energia Solar; Usina Solar Termoeletrica; Estudos de Localização; Sistemas de Informação Geográfica; Análise de Decisão Multicritério; LCOE.

ABSTRACT

Notably in recent years, the generation of electricity using energy from renewable resources has presented continuous increase, which is due to, especially, the concerns about climate changes, the dependency in fossil fuel and the necessity of production of electric energy with resources to decrease the negative impacts in the environmental. The global renewable power generation capacity, which presented 800GW on the beginning of 2004, reaching an estimated 1,712GW at year's end 2014, and the renewable electricity global production in 2014 presented 22.8%. Brazil has a mainly renewable energy matrix. In 2014, 74.6% of the electricity produced came from renewable sources of energy. The remaining percentage comes from fossil fuels and nuclear sources (25.4%). Although it shows a remarkably renewable character, it is notable that the main source of generation of electricity is the water source, which is susceptible the climate changes, and should present the reduction in your capacity installed in a long term. As a way of contributing to diversify the energy matrix Brazilian, this work presents two different methodologies macro spatial for the selection of the best sites for insertion of solar thermal power plants: the methodologies based on analytic hierarchy process (AHP) where the selection the best site was based on means of the hierarchical organization of criteria according to axioms of the AHP method; and the method based on cost of electricity generation where the best site were selected according to Levelised Cost of Electricity (LCOE). Both studies were made in Pernambuco, located in Northeastern Region of Brazil and considered the implementation of a parabolic trough solar power plant, of 80MWe, operating exclusively in solar mode, without thermal stores. The analyzes performed confirmed that the Pernambuco presents great potential for the installation of solar thermal power plants, especially, in the Sertão Pernambucano where the best sites were located. In the methodologies AHP, for example, this region presented great potential for the installation in all scenarios analyzed, including the Ponto de Partida scenarios where weights are not used. In the method based on cost of electricity, the Sertão presented great potential also. In this region it is possible to find electric energy generation costs by MWh of the order of R\$ 337.16. This costs are still high when comparing the cost of generation of the hydraulic source (R\$ 182.09/MWh) in Brazil, although, they comply as to expected for its insertion in the Brazilian Market. The methodologies used demonstrated very consistent and identified a promising potential for solar thermal power generation in Pernambuco. This potential should be analyzed in details and include the local measurement of the incident direct normal solar irradiation for at least five years.

Keywords: Solar Energy; Solar Concentrated Power Plant; Locations Studies; Geographic Information Systems; Multicriteria Decision Analysis; LCOE.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Produção de Eletricidade Global em 2014.....	19
Figura 02 – Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte de Geração.	20
Figura 03 – Usina Solar Termoeletrica de Coletores Cilindricos Parabólicos SEGS.	26
Figura 04 – Usina Solar Termoeletrica ANDASOL I, Usina de Concentradores Lineares de Fresnel de Kimberlina e Torre de Potência PS10.....	29
Figura 05 – Capacidade Acumulada das Usinas Solares Termoeletricas Instaladas no Mundo no Final de 2014.	30
Figura 06 – Ilustração Esquemática de um Coletor Cilindrico Parabólico.	31
Figura 07 – Ilustração do Sistema de Rastreamento Solar do Coletor Cilindrico Parabólico..	33
Figura 08 – Esquema de Usina Solar Termoeletrica de Coletores Cilindricos Parabólicos	34
Figura 09 – Diagrama Ilustrativo de Usina SEGS com Armazenadores Térmicos.....	35
Figura 10 – Esquema da Utilização de Armazenadores Térmicos em uma Usina CSP de 250MW de Capacidade Instalada	36
Figura 11 – Espectro Solar Extraterrestre e na Superfície Terrestre	38
Figura 12 – Definição dos Ângulos Usados nos Cálculos Ópticos	40
Figura 13 – Ilustração das Perdas Relacionadas ao Sombreamento nos Coletores.....	43
Figura 14 – Ilustração do Fator de Perdas nas Extremidades do Coletor Solar	44
Figura 15 – Projeção da Redução dos Custos de Investimento de uma Planta CSP	48
Figura 16 – Componentes de um SIG	65
Figura 17 – Representação das Estruturas Vetorial e Matricial	69
Figura 18 – Classificação das Operações na Álgebra de Mapas	72
Figura 19 – Operadores da Lógica <i>Booleana</i>	74
Figura 20 – Representação da Utilização da Máscara nas Operações de Vizinhança.....	75
Figura 21 – Representação das Vizinhanças 4 e 8 de uma Imagem Digital.....	76
Figura 22 – Determinação da Distância Euclidiana para um Dado Matricial	77
Figura 23 – Fronteiras Interpostas pelas Lógicas <i>Fuzzy</i> e <i>Booleana</i>	79
Figura 24 – Funções de Pertinência Triangular, Trapezoidal, Gaussiana e Sigmoidal	81
Figura 25 – Ilustração Gráfica da Distribuição da Operação <i>Fuzzy Gama</i>	84
Figura 26 – Etapas de Construção do Raciocínio <i>Fuzzy</i>	85
Figura 27 – Estrutura Hierárquica de um Processo de Decisão no Método AHP	89
Figura 28 – Matriz de Comparação de Critérios	91
Figura 29 – Matriz Auxiliar para a Obtenção dos Pesos	92

Figura 30 – Pesos Estimados	92
Figura 31 – Matriz Auxiliar A'	93
Figura 32 – Vetor Prioridade P'	94
Figura 33 – Vetor Prioridade P''	94
Figura 34 – Maior Autovalor da Matriz de Comparação de Critérios'	94
Figura 35 – Mapa das Mesorregiões do Estado de Pernambuco	101
Figura 36 – Mapa de Infraestrutura de Transporte do Estado de Pernambuco	106
Figura 37 – Mapa das Linhas de Distribuição do Estado de Pernambuco	109
Figura 38 – Mapa de Demografia x Consumo de Energia Elétrica em Pernambuco	111
Figura 39 – Processo de Abstração do Mundo Real para o Método AHP	114
Figura 40 – Procedimentos Metodológicos Realizados para a Definição das Áreas Potenciais a partir do uso do Método AHP	116
Figura 41 – Construção da Base de Dados Espaciais para Utilização no Método AHP	121
Figura 42 – Mapa da Radiação Solar Direta Normal (Anual) do Estado de Pernambuco	125
Figura 43 – Mapa de Declividade do Estado de Pernambuco	127
Figura 44 – Mapa Hidrográfico do Estado de Pernambuco	129
Figura 45 – Mapa das Distâncias aos Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco	131
Figura 46 – Mapa Rodoviário do Estado de Pernambuco	133
Figura 47 – Mapa das Distâncias às Principais Rodovias do Estado de Pernambuco	135
Figura 48 – Mapa das Distâncias às Linhas de Distribuição do Estado de Pernambuco	137
Figura 49 – Mapa das Áreas Urbanas e de Expansão Urbana do Estado de Pernambuco	140
Figura 50 – Mapa das Distâncias às Áreas Urbanas do Estado de Pernambuco	141
Figura 51 – Mapa de Aptidão Agrícola do Estado de Pernambuco	143
Figura 52 – Mapa das Áreas de Restrição do Estado de Pernambuco	145
Figura 53 – Processo de Abstração do Mundo Real para o Método do Custo de Produção de Eletricidade	158
Figura 54 – Procedimentos Metodológicos Realizados para a Definição das Áreas Potenciais pelo Método do Custo de Produção de Eletricidade	160
Figura 55 – Construção da Base de Dados Espaciais para o Método do Custo de Produção de Eletricidade	163
Figura 56 – Mapa da Temperatura Média Anual do Estado de Pernambuco	166
Figura 57 – Ilustração da Determinação do Custo Total de Infraestrutura da Usina Solar	168
Figura 58 – Mapa da Aptidão Individual da Radiação Solar Direta Normal	175
Figura 59 – Mapa da Aptidão Individual da Declividade do Terreno	176

Figura 60 – Mapa da Aptidão Individual do Indicador Distância às Linhas de Distribuição	177
Figura 61 – Mapa da Aptidão Individual do Indicador Distância aos Recursos Hídricos	178
Figura 62 – Mapa da Aptidão Individual do Indicador Distância às Principais Rodovias.....	179
Figura 63 – Mapa da Aptidão Individual do Indicador Distâncias às Áreas Urbanas e de Expansão Urbana.....	180
Figura 64 – Mapa da Aptidão Individual do Indicador Uso e Ocupação do Solo.....	181
Figura 65 – Mapa de Aptidão das Áreas para Instalação de Usinas Solares de 80MWe no Estado de Pernambuco - Cenário Ponto de Partida	183
Figura 66 – Mapa de Aptidão das Áreas para Instalação de Usinas Solares de 80MWe no Estado de Pernambuco - Cenário 1	187
Figura 67 – Mapa de Aptidão das Áreas para Instalação de Usinas Solares de 80MWe no Estado de Pernambuco - Cenário 2	191
Figura 68 – Mapa de Aptidão das Áreas para Instalação de Usinas Solares de 80MWe no Estado de Pernambuco - Cenário 3	194
Figura 69 – Processo de Validação do Modelo para o Município de Salgueiro - Estado de Pernambuco	200
Figura 70 – Processo de Validação do Modelo para o Município de Ibimirim - Estado de Pernambuco	203
Figura 71 – Mapa do Custo Total de Infraestrutura de uma Usina Solar de 80MWe para o Estado de Pernambuco.....	207
Figura 72 – Mapa da Produção Anual de Energia Elétrica de uma Usina Solar de 80MWe para o Estado de Pernambuco.....	209
Figura 73 – Mapa do Custo de Produção de Eletricidade de uma Usina Solar de 80MWe para o Estado de Pernambuco.....	211
Figura 74 – Mapa do Custo de Produção de Eletricidade de uma Usina Solar de 80MWe para o Estado de Pernambuco (Desconsiderando o Custo Total de Infraestrutura).....	213
Figura 75 – Mapa do Custo de Produção de Eletricidade de uma Usina Solar de 80MWe com Áreas de Restrição para o Estado de Pernambuco	215
Figura 76 – Mapa das Áreas com Potencial de Instalação de Usinas Solares Termoelétricas de 80MWe para o Estado de Pernambuco.....	217
Figura 77 – Mapa das Áreas com Potencial de Instalação de Usinas Solares Termoelétricas de 80MWe para o Estado de Pernambuco (Considerando Terrenos com Declividade maior que 2% como Área de Restrição).....	219

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Projeção da Redução do LCOE para Usinas CSP com Armazenadores Térmicos num Cenário de Alto Incentivo às Renováveis (<i>hi-Ren Scenarios</i>)	48
Tabela 02 – Pesos dos Subcritérios do Estudo de ARÁN CARRIÓN et al., (2008).....	51
Tabela 03 – Classificação dos Parâmetros que afetam a Localização Ótima de Fazendas Solares segundo o Estudo de CHARABI e GASTLI (2011)	52
Tabela 04 – Pesos dos Subcritérios do Estudo de SANCHÉZ-LOZANO et al., (2013).....	55
Tabela 05 – Critérios e dos Subcritérios do Estudo de SANCHÉZ-LOZANO et al., (2014) ..	57
Tabela 06 – Escala Fundamental de Saaty	90
Tabela 07 – Valores Empíricos do Índice de Consistência Randômico.....	95
Tabela 08 – Principais Características das Cinco Mesorregiões do Estado de Pernambuco .	104
Tabela 09 – Especificação dos Critérios, Subcritérios e Indicadores Positivos	118
Tabela 10 – Indicadores Negativos ou Restrições.....	119
Tabela 11 – Matriz de Comparação dos Critérios para o Cenário 1	150
Tabela 12 – Matriz Auxiliar para a Obtenção dos Pesos dos Critérios - Cenário 1	151
Tabela 13 – Pesos Finais e Valores de $\lambda_{\max}$, IC e RC para os Subcritérios - Cenário 1	152
Tabela 14 – Matriz de Comparação dos Critérios para o Cenário 2	152
Tabela 15 – Matriz Auxiliar para a Obtenção dos Pesos dos Critérios - Cenário 2	153
Tabela 16 – Pesos Finais e Valores de $\lambda_{\max}$, IC e RC para os Subcritérios - Cenário 2	153
Tabela 17 – Matriz de Comparação dos Critérios para o Cenário 3	154
Tabela 18 – Matriz Auxiliar para a Obtenção dos Pesos dos Critérios - Cenário 3	154
Tabela 19 – Pesos Finais e Valores de $\lambda_{\max}$, IC e RC para os Subcritérios - Cenário 3.....	155
Tabela 20 – Parâmetros Fixos Usados no Método do Custo de Produção de Eletricidade....	161
Tabela 21 – Informações de Localização, Condições Meteorológicas e de Tempo Universal Coordenado para Uso no Algoritmo SOLPOS	170
Tabela 22 – Valores Usados na Representação dos Efeitos de Sombreamento, Perdas Finais do Coletor e Modificador do Ângulo de Incidência em Pernambuco	171
Tabela 23 – Coeficientes Usados na Determinação da Energia Térmica Absorvida	171
Tabela 24 – Área Total Disponível para a Inserção de Projetos CSP em Pernambuco	218
Tabela 25 – Área Total Disponível para a Inserção de Projetos CSP em Pernambuco (Considerando Terrenos com Declividade maior que 2% como Área de Restrição).....	220
Tabela 26 – Preço Médio da Eletricidade Gerada por Outras Fontes Renováveis no Brasil .	220

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACR – Ambiente de Contratação Regulada
ADM – Análise de Decisão Multicritério
AHP – Analytic Hierarchy Process
ANA – Agência Nacional de Águas
ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
ANTAQ – Agência Nacional de Transportes Aquaviários
APA – Áreas de Proteção Ambiental
ARIE – Área de Relevante Interesse Ecológico
BDE – Base de Dados Espaciais
BEN – Balanço Energético Nacional
BIG – Banco de Informações de Geração
CBTU – Companhia Brasileira de Trens Urbanos
CELPE – Companhia Energética de Pernambuco
CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais
CEPEL – Centro de Pesquisas da Eletrobrás
CGH – Centrais Geradoras Hidroelétricas
CHESF – Companhia Hidroelétrica do São Francisco
CI – Consistency Index
CONDEPE/FIDEM – Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco
CPRH – Agência Estadual de Meio Ambiente
CPTEC – Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
CR – Consistency Ratio
CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica
CSP – Concentrated Solar Power
CTN – Código Tributário Nacional
DEN – Departamento de Energia Nuclear
DER-PE – Departamento de Estradas de Rodagem de Pernambuco
DGC – Dirección General del Catastro
DMA – Divisão de Clima e Meio Ambiente
DNI – Direct Normal Irradiation

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DoE – Department of Energy
DOU – Diário Oficial da União
DSG – Direct Steam Generation
EDSS – Environmental Decision-Support System
ELECTRE – Elimination and (et) Choice Translating Algorithm
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EOL – Centrais Geradoras Eólicas
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
ESEC – Estações Ecológicas
ESRI – Environmental Systems Research Institute
FLONA – Floresta Nacional
FUNAI – Fundação Nacional do Índio
FURB – Reserva de Floresta Urbana
FV – Relativo à Fotovoltaico
GEE - Gases de Efeito Estufa
GEF – Fundo Global para o Meio Ambiente
GPS – Global Positioning System
GW - Gigawatt
GWe – Gigawatt elétrico
hi-Ren – High Renewables Scenario
HTF – Heat Transfer Fluid
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMBio – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
IEA – International Energy Agency
INCRA – Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
INDE – Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais
INFRAERO – Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISCC – Integrated Solar Combined Cycle
IV_{prox} – Infravermelho Próximo
LABSOLAR/UFSC – Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina

LCOE – Levelised Cost of Electricity
MDE – Modelo Digital de Elevação
METROREC – Superintendência de Trens Urbanos do Recife
MMA – Ministério do Meio Ambiente
MME – Ministério de Minas e Energia
MN – Monumento Natural
MW - Megawatt
MWe – Megawatt elétrico
NASA – National Aeronautics and Space Administration
NIS – Negative Ideal Solution
NREL – National Renewable Energy Laboratory
NVAP – NASA Water Vapour Project
O&M – Operação e Manutenção
OMM – Organização Meteorológica Mundial
ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico
OWA – Ordered Weighted Averaging
P&D – Pesquisa e Desenvolvimento
PARNA – Parques Nacionais
PCH – Pequenas Centrais Hidrelétricas
PDI – Processamento Digital de Imagens
PE – Parques Estaduais
PIB – Produto Interno Bruto
PIS – Positive Ideal Solution
PNE – Plano Nacional de Energia
PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PROTEN – Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares
PURPA – Public Utility Regulatory Policy Act
REBIO – Reservas Biológicas
REN21 – Relatório de Status Global de Energias Renováveis
RESEX – Reserva Extrativista
REVIS – Refúgios de Vida Silvestre
RI – Random Consistency Index
RIDE – Região Integrada de Desenvolvimento
RMR – Região Metropolitana do Recife

RPNN – Reservas Particulares do Patrimônio da União

SABESP – Empresa de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

SAD69 – South American Datum of 1969

SAR – Sensor de Abertura Sintética

SCE – Southern California Edison

SCN – Sistema Cartográfico Nacional

SEGS – Solar Electric Generating Systems

SEUC – Sistema Estadual de Unidades de Conservação da Natureza

SGB – Sistema Geodésico Brasileiro

SGBD – Sistema Gerenciador de Banco de Dados

SGR – Sistema Geodésico de Referência

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SIN – Sistema Interligado Nacional

SIRGAS2000 – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

SOLPOS – Sun Positions Algorithm

SONDA – Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais

SOSMA – Fundação SOS Mata Atlântica

SRTM – Shuttle Radar Topography Mission

SSE - Surface Meteorology and Solar Energy

SWERA – Solar and Wind Energy Resource Assessment

TOMS – Total Ozone Mapping Spectrometrer Project

UC – Unidades de Conservação

UFPE – Universidade Federal de Pernambuco

UFV – Centrais Geradoras Solar Fotovoltaica

UHE – Usinas Hidrelétricas

UNESO – United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

USGS – United States Geological Survey

UTC – Coordinated Universal Time

UTE – Usinas Termelétricas

UV – Ultravioleta

WLC – Weighted Linear Combination

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	19
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	26
2.1 Usina Solar Termoeletrica de Coletores Cilindricos Parabólicos.....	26
2.1.1 Evolução Recente das Usinas Solares Termoeletricas	26
2.1.2 Descrição da Tecnologia	31
2.1.2.1 Tecnologia de Coletores Cilindricos Parabólicos	31
2.1.2.2 Usina Solar Termoeletrica de Coletores Cilindricos Parabólicos.....	34
2.1.3 Radiação Solar	38
2.1.3.1 Espectro Solar	38
2.1.3.2 Parâmetros Geométricos e a Posição do Sol.....	39
2.1.4 Modelo Óptico e Térmico da Usina Solar	41
2.1.5 Análise Econômica	46
2.1.5.1 Redução dos Custos da Tecnologia	47
2.1.6 Estudos de Localização	49
2.1.6.1 Localização pelo Uso do Processo Analítico Hierárquico.....	50
2.1.6.2 Localização pelo Custo de Produção de Eletricidade	59
2.1.7 Planejamento Energético da Inserção de Usinas Solares no Brasil.....	62
2.2 Tecnologias do Geoprocessamento no Suporte aos Estudos de Localização de Usinas Solares Termoeletricas.....	64
2.2.1 SIG - Sistemas de Informação Geográfica	64
2.2.1.1 Componentes de um SIG	65
2.2.1.2 Representação da Informação Geográfica	67
2.2.1.3 Análises Espaciais.....	70
2.2.2 Álgebra de Mapas	71
2.2.2.1 Operações Pontuais.....	73
2.2.2.2 Operações de Vizinhança.....	75
2.2.2.3 Operações Zonais.....	76
2.2.2.4 Operações Globais	77
2.2.3 Lógica <i>Fuzzy</i>	78
2.2.3.1 Conjuntos <i>Fuzzy</i> e Funções de Pertinência.....	79
2.2.3.2 Operações entre Conjuntos <i>Fuzzy</i>	82
2.2.3.3 Raciocínio da Lógica <i>Fuzzy</i>	84

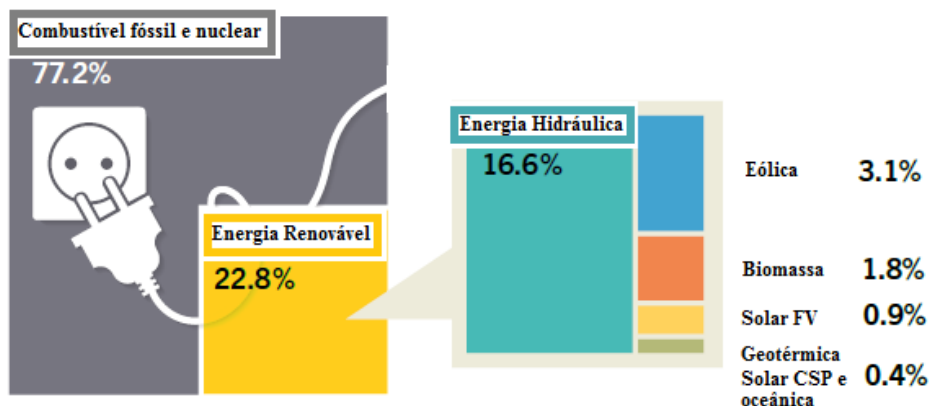
2.3	Análise de Decisão Multicritério	86
2.3.1	Processo Analítico Hierárquico (Método AHP).....	87
2.3.1.1	Definição do Objetivo.....	87
2.3.1.2	Especificação das Hierarquias	88
2.3.1.3	Construção do Modelo.....	90
2.3.1.4	Avaliação da Consistência do Modelo.....	93
2.3.1.5	Apresentação dos Resultados.....	95
3	MATERIAL E MÉTODOS	97
3.1	Recursos Utilizados	97
3.1.1	Equipamentos, Processos e Programas Computacionais.....	97
3.1.2	Base de Dados Espaciais	97
3.1.2.1	Arquivos Vetoriais.....	97
3.1.2.2	Arquivos Matriciais	99
3.2	Área de Estudo: O Estado de Pernambuco.....	100
3.2.1	Caracterização Geográfica: O Estado por Mesorregiões.....	100
3.2.2	Informações sobre Infraestruturas	104
3.2.2.1	Infraestrutura de Transporte.....	104
3.2.2.2	Infraestrutura do Sistema Elétrico	107
3.2.3	Demografia e Consumo de Energia Elétrica	110
3.3	Procedimentos Metodológicos	112
3.3.1	Metodologia da Localização pelo Uso do Método AHP	113
3.3.1.1	Modelagem Conceitual de Dados Geográficos - Método AHP	113
3.3.1.2	Procedimentos Metodológicos Realizados para Aplicação do Método AHP	115
3.3.1.3	Objetivo do Método	117
3.3.1.4	Definição dos Critérios e Subcritérios	117
3.3.1.5	Definição da Regra de Decisão e Cálculo da Consistência do Modelo	150
3.3.1.6	Aptidão das Áreas para a Inserção da Usina Solar Termoelétricas.....	155
3.3.1.7	Localização da Usina Solar Termoelétrica pelo Método AHP	156
3.3.1.8	Validação do Modelo.....	157
3.3.2	Metodologia da Localização pelo Custo de Produção de Eletricidade	157
3.3.2.1	Modelagem Conceitual de Dados Geográficos - Método do Custo de Produção de Eletricidade	157
3.3.2.2	Procedimentos Metodológicos Realizados para a Aplicação do Método do Custo de Produção de Eletricidade.....	159
3.3.2.3	Definição dos Parâmetros de Entrada	161

3.3.2.4	Determinação do Custo Total de Infraestrutura	167
3.3.2.5	Determinação da Produção Anual de Energia Elétrica	169
3.3.2.6	Modelagem da Equação do Custo de Produção de Energia Elétrica no SIG	172
3.3.2.7	Determinação do Custo de Produção de Eletricidade	173
3.3.2.8	Análises de Disponibilidade de Área	173
3.3.2.9	Localização da Usina Solar Termoelétrica	173
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	174
4.1	Resultados do Estudo de Localização pelo Uso do Método AHP.....	174
4.1.1	Apresentação da Aptidão Individual dos Indicadores Positivos	174
4.1.1.1	Aptidão relacionada à Radiação Solar Direta Normal	174
4.1.1.2	Aptidão relacionada à Declividade	176
4.1.1.3	Aptidão relacionada à Distância das Linhas de Distribuição.....	177
4.1.1.4	Aptidão relacionada à Distância dos Recursos Hídricos	178
4.1.1.5	Aptidão relacionada à Distância das Principais Rodovias	179
4.1.1.6	Aptidão relacionada à Distância das Áreas Urbanas e de Expansão Urbana.....	180
4.1.1.7	Aptidão relacionada ao Uso e Ocupação do Solo	181
4.1.2	Identificação das Áreas Aptas à Instalação pelo Método AHP	182
4.1.2.1	Resultados Encontrados para o Cenário 1.....	186
4.1.2.2	Resultados Encontrados para o Cenário 2.....	190
4.1.2.3	Resultados Encontrados para o Cenário 3.....	193
4.1.3	Validação do Modelo.....	199
4.2	Resultados da Localização pelo Custo de Produção de Eletricidade.....	206
4.2.1	Análises e Diagnósticos.....	206
4.2.1.1	Resultado da Determinação do Custo Total de Infraestrutura da Usina Solar.....	206
4.2.1.2	Resultado da Determinação da Produção Anual de Energia Elétrica	208
4.2.1.3	Custos de Produção de Eletricidade.....	210
4.2.2	Identificação das Áreas Promissoras	214
4.2.2.1	Análises de Disponibilidade de Área.....	214
4.2.2.2	Identificação das Áreas Aptas.....	216
5	CONCLUSÃO.....	221
6	PERSPECTIVAS	223
	REFERÊNCIAS	224
	APÊNDICE.....	231
	ANEXO.....	234

1. INTRODUÇÃO

Notadamente nos últimos anos, a geração de eletricidade a partir de fontes renováveis de energia tem apresentado contínuo aumento. Este crescimento está relacionado, sobretudo, às preocupações com as mudanças climáticas globais, a dependência dos combustíveis fósseis cujos preços estão sujeitos à variação do cenário geopolítico global, ao direcionamento dos investimentos financeiros dados a esta forma de geração e a necessidade de suprir a geração interna de energia com recursos que produzam menos impactos ao meio ambiente. Segundo dados do Relatório de Status Global de Energia Renováveis (REN21, 2015), a capacidade instalada da energia renovável, que foi de 800GW no início de 2004, alcançou 1.712GW no ano de 2014 e a participação na matriz energética global em 2014 foi de 22,8%, com maior representatividade da energia hidráulica (16,6%), seguida da eólica (3,1%). As outras fontes renováveis de energia representaram juntas 3,1% da geração, conforme ilustra a Figura 01.

Figura 01 – Produção de Eletricidade Global em 2014.



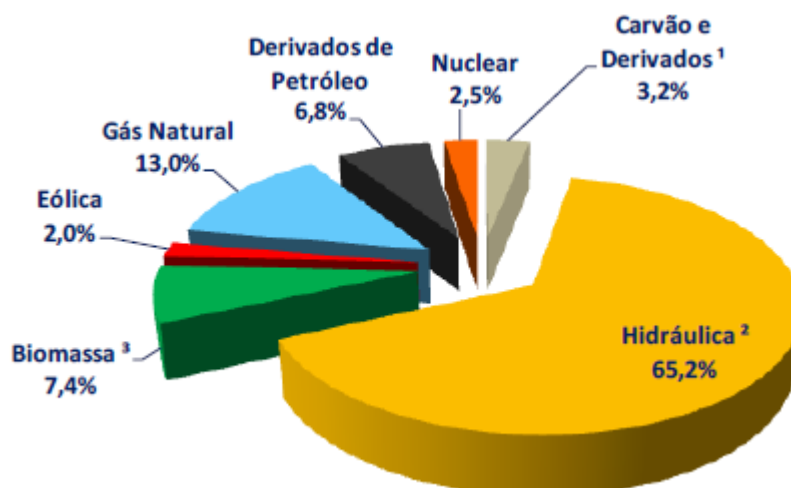
Produção de Eletricidade Global em 2014: combustíveis fósseis e fontes nucleares representaram 77,2% da produção de eletricidade mundial. Por outro lado, as fontes renováveis proveram 22,8%, com maior percentual da energia hidráulica (16,6%), seguida da eólica (3,1%). As fontes biomassa, geotérmica, solar fotovoltaica (FV), solar concentrada (CSP) e oceânica, representaram juntas 3,1% de geração.

Fonte Adaptada: REN21 (2015).

A participação das fontes renováveis de energia na matriz energética global tenderá a crescer nos próximos anos. De acordo com REN21 (2015) em um cenário de continuidade de políticas atuais, apresentado pela Agência Internacional de Energia – *Internacional Energy Agency* (IEA), a participação das renováveis será de 30% a 45% no ano 2050. Já em um cenário mais otimista, defendido especialmente por ambientalistas e visionários, essa participação poderá atingir de 50% a 95% neste ano.

A matriz energética brasileira possui características distintas da matriz global e se apresenta predominantemente renovável. Segundo dados do Balanço Energético Nacional – BEN, desenvolvido pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2015), cerca de 74,6% da energia elétrica gerada em 2014 proveio de fontes renováveis de energia (produção nacional mais as importações que são essencialmente de origem renovável), com maior participação da fonte hidráulica (65,2%), seguida da biomassa (7,4%) e da eólica (2,0%). O percentual restante (25,4%) procedeu dos combustíveis fósseis e das fontes nucleares conforme ilustra a Figura 02.

Figura 02 – Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte de Geração.



¹ Inclui gás de coqueira; ² Inclui importação de eletricidade; ³ Inclui lenha, bagaço de cana, lixo e outras recuperações. Informações obtidas do Relatório Síntese do BEN de 2015. Fonte: EPE (2015).

Conforme apresentado na Figura 02, o aproveitamento hidráulico constitui o principal sistema de geração de eletricidade do Brasil, entretanto, diversos estudos apontam que esse cenário poderá sofrer alterações em longo prazo, como a redução da capacidade instalada da fonte hidráulica devido a sua vulnerabilidade às mudanças climáticas globais e locais. Nos dias atuais, quando isso ocorre, o uso de usinas termelétricas é expandido com a finalidade de suprir a geração de eletricidade.

De fato, as sucessivas baixas hídricas exibidas pelo Sistema de Geração da Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), mostraram quão intensa é a redução da capacidade instalada da fonte hidráulica quando o sistema é acometido por longos períodos de estiagem. Ações como, por exemplo, a redução drástica da vazão de água e a captação do volume morto foram algumas das medidas tomadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), pela CHESF (Sobradinho) e pela Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG (Três Marias) para administrar a crise hídrica que o Brasil vem enfrentando.

Segundo BURGI (2013), outro agravante para a geração de eletricidade por fontes hidráulicas em longo prazo está no fato de que o grande potencial remanescente se encontra no bioma amazônico o que torna o processo de aproveitamento energético mais minucioso e oneroso em tempo, em função das restrições ambientais. Ademais, o aumento da capacidade instalada de usinas hidrelétricas nesta região do País demandará, sem dúvida, a expansão da infraestrutura de linhas de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN).

Devido a essas questões relativas à geração de eletricidade pela fonte hidráulica no Brasil, é necessário expandir a capacidade instalada de outras fontes renováveis de energia. Uma forma de aproveitamento energético ainda sem exploração em projetos de larga escala é a produção de eletricidade por meio do recurso solar.

A tecnologia solar para a geração de eletricidade em larga escala é uma realidade no mundo desde a década de 80, quando foram construídas as primeiras usinas solares de grande porte nos Estados Unidos. O processo de geração de energia pode ser feito de dois modos distintos: conversão fotovoltaica e conversão térmica. Na conversão fotovoltaica, são usados elementos semicondutores fotossensíveis que convertem a radiação solar em uma diferença de potencial nos terminais P-N¹ cuja ligação elétrica resulta na circulação de corrente contínua. Nesta conversão, a radiação solar de maior interesse é a radiação global horizontal, que quantifica a radiação recebida por uma superfície plana horizontal.

Por outro lado, na conversão térmica ou na Energia Solar Concentrada – *Concentrated Solar Power* (CSP), superfícies espelhadas (coletores solares e arranjos de heliostatos) são usadas para refletir e concentrar a radiação solar incidente em superfícies relativamente pequenas, a altas temperaturas. Por meio da conversão térmico-mecânica e uso de dispositivos adequados, essa radiação é convertida em eletricidade e pode ser ligada com a rede de energia. Nesse tipo de conversão, a principal fonte de energia é a radiação solar direta normal.

¹ Junção P-N se refere à estrutura fundamental dos componentes eletrônicos (diodos e transistores) formada pela junção de dois cristais, Silício e Germânio, de natureza P e N respectivamente, segundo sua composição a nível atômico.

Para a conversão térmica da Energia Solar, objeto de pesquisa desta Tese, é de conhecimento que o Brasil apresenta grande potencial para o desenvolvimento de projetos em larga escala. Tal potencial tem sido amplamente comprovado em diversos trabalhos, como por exemplo, nos trabalhos de TIBA et al., (2012), GUIMARÃES (2010), FRAIDENRAICH et. al., (2009) e CAVALCANTI e PETTI (2008). Observa-se que as principais barreiras para a inserção desta tecnologia no mercado brasileiro são a falta de incentivos e metas para seu desenvolvimento e os custos associados.

Como uma forma de contribuir para a inserção da tecnologia solar termoelétrica no Brasil, esta pesquisa apresenta duas abordagens macroespaciais distintas para a localização de usinas solares termoelétricas de coletores cilíndricos parabólicos: o Método baseado no Processo Analítico Hierárquico – *Analytic Hierarchy Process* (AHP) e o Método do Custo de Produção de Eletricidade. Ambas as metodologias foram aplicadas para o estado de Pernambuco, localizado na região Nordeste do Brasil, e considerou a implantação de uma usina de 80MWe, operando exclusivamente em modo solar, sem armazenadores térmicos.

Na aplicação do Método AHP, questões de ordem técnica, econômica e ambiental foram consideradas para a definição das áreas aptas. Nele, o problema da localização foi dividido em níveis hierárquicos, como pressupõe os axiomas do método AHP, visando estabelecer alternativas de resolução para uso na definição das classes de aptidão no território pernambucano.

Em contrapartida, na utilização do Método do Custo de Produção de Eletricidade, as áreas aptas à instalação foram definidas a partir da avaliação do potencial técnico, ambiental e econômico, com base no custo nivelado da eletricidade LCOE (*Levelised Cost of Electricity*). Este custo foi calculado para uma usina solar localizada hipoteticamente na área de estudo, a partir da consideração da produção anual de energia elétrica e dos custos de capital, de infraestrutura e de operação e manutenção do sistema ao longo de sua vida útil.

Os dois estudos de localização descritos anteriormente, foram ainda subsidiados pelas Tecnologias do Geoprocessamento (SIG, Álgebra de Mapas, entre outras) que foram responsáveis pelo processamento, análise e disponibilização da informação geográfica, por meio de soluções dadas em função de *hardwares*, *softwares*, para produzir os mapas temáticos e prover subsídios para a tomada de decisão. O estudo de localização pelo uso do método AHP foi ainda subsidiado pelas definições da Análise de Decisão Multicritério (ADM), que vieram a fornecer a este trabalho mecanismos de análise do problema (complexo) de definição de áreas com potencial de instalação de usinas solares.

É importante ressaltar que a introdução de usinas solares de grande porte no estado de Pernambuco, particularmente nas regiões semiáridas que são as mais adequadas, produzirá benefícios sociais e a geração de emprego e renda uma vez que são gerados novos postos de trabalho nas etapas de construção e Operação e Manutenção (O&M) da planta solar.

A repercussão técnica e econômica da introdução de usinas solares termoeletrica na matriz energética brasileira poderá ser muito grande uma vez que se espera fornecer 11% da demanda mundial de eletricidade, no ano de 2050, a partir de tecnologias de concentração CSP, (IEA, 2014). Neste sentido, é importante (e necessário) que o sistema elétrico brasileiro viabilize junto com demais órgãos interessados, estudos que avaliem detalhadamente o potencial técnico disponível e planejem atividades de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) para promover a aprendizagem da tecnologia.

Esta Tese de Doutorado tem como principal objetivo desenvolver metodologias para auxiliar a identificação de áreas potenciais para a inserção de usinas solares termoeletricas. Como estudo de caso foi analisado a implantação dessas usinas no estado de Pernambuco. Como objetivos específicos, esta Tese almeja:

a) Para o Método do Custo de Produção de Eletricidade:

- i. Determinar a produção anual de eletricidade para todo o estado de Pernambuco com base em um modelo simplificado que considera as principais perdas existentes numa usina de coletores parabólicos.
- ii. Determinar o custo total de infraestrutura para a interligação elétrica, rodoviária e hídrica da usina solar, avaliando sua relação com o custo final da eletricidade gerada.

b) Para o Método AHP:

- i. Determinar os pesos para os critérios e subcritérios do estudo por meio da utilização do método AHP.
- ii. Realizar a normalização dos dados espaciais, pela lógica *fuzzy* ou *booleana*, para permitir que sejam agregados entre si.
- iii. Realizar a Combinação Linear Ponderada para que seja possível agregar os subcritérios do estudo aos seus respectivos pesos ou condição lógica.

A presente Tese de Doutorado está estruturada em seis capítulos: O **Capítulo 1**, de caráter introdutório, foi descrito anteriormente.

O **Capítulo 2** apresenta os principais aspectos das Usinas Solares Termoelétricas de Coletores Cilíndricos Parabólicos: sua evolução recente, iniciada na década de 80 quando os primeiros sistemas de grande porte foram conectados à rede elétrica no mundo; seus aspectos técnicos; a avaliação econômica a partir da definição do Custo Nivelado da Energia – *Levelised Cost of Electricity* (LCOE) e a apresentação de estudos com as duas principais abordagens metodológicas usadas atualmente para a Localização das Usinas Solares: Método baseado no Método AHP e o Método do Custo de Produção de Eletricidade. É também apresentada uma discussão do planejamento energético da inserção da tecnologia solar termoelétrica no Brasil, onde são apresentados os principais agentes precursores para seu desenvolvimento (a avaliação do potencial técnico, a redução dos custos da tecnologia, a definição de políticas de incentivo e os leilões de energia).

Ainda no Capítulo 2 são apresentadas as Tecnologias do Geoprocessamento utilizadas nesta pesquisa: os SIG, com sua definição, apresentação de seus componentes e uma breve explanação sobre análises espaciais; a Álgebra de Mapas, com seus principais conceitos e operadores; e a Lógica *Fuzzy* com apresentação de suas funções de pertinência, operadores e as etapas de construção do raciocínio *fuzzy*. Também é mostrado neste capítulo a Análise de Decisão Multicritério com foco no Método AHP.

No **Capítulo 3** está relacionado todo o material utilizado para a construção desta pesquisa (equipamentos, programas computacionais e os dados espaciais) como também é apresentada a Área de Estudo: o estado de Pernambuco, com suas características destacadas por mesorregiões, sobretudo aquelas relacionadas à demografia e o consumo de energia e as infraestrutura de transporte e do sistema elétrico.

Ainda no Capítulo 3 são apresentados os Procedimentos Metodológicos usados para cada uma das abordagens destinadas a definição das áreas potenciais: a Localização pelo uso do Método AHP e a Localização pelo Método do Custo de Produção de Eletricidade.

O **Capítulo 4** apresenta os Resultados e as Discussões inerentes a cada metodologia analisada. Na metodologia AHP, é mostrada inicialmente a aptidão individual dos *layers* importantes no estudo para a identificação das áreas aptas. Na sequência são apresentadas as áreas aptas à instalação a partir da agregação de todos os *layers*, em classes de aptidão, para cada cenário de estudo. Também para esta metodologia são apresentados os procedimentos de validação do modelo.

Na metodologia do Custo de Produção de Eletricidade são mostrados, primeiramente, os resultados da simulação da produção anual de energia elétrica da usina e dos custos totais de infraestrutura necessários à interligação da usina solar. Posteriormente, são apresentados os custos de geração de energia elétrica para todo o estado de Pernambuco e as áreas mais promissoras para o desenvolvimento da tecnologia solar.

No **Capítulo 5** poderão ser encontradas as Conclusões da pesquisa e no **Capítulo 6** estão as Perspectivas de Novos Trabalhos, apresentadas em texto sequencial.

Como partes finais da pesquisa estão as Referências Bibliográficas e também os Apêndices e os Anexos, que apresentam, respectivamente, dados que foram obtidos com esta pesquisa e dados obtidos por outros autores que foram utilizados para complementar as discussões e as metodologias da Tese de Doutorado.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Usina Solar Termoelétrica de Coletores Cilíndricos Parabólicos

2.1.1 Evolução Recente das Usinas Solares Termoelétricas

Para TIBA et al., (2012) a evolução recente das usinas solares termoelétricas inicia-se na **década de 80**, quando as torres de potência SOLAR I (10MW; EUA), CESA I (1,2MW; Espanha), THEMIS (2,5MW; França), EURÉLIOS (1,0MW; Itália), e NIO (1,0MW; Japão) foram conectadas à rede de energia elétrica no ano de 1981.

Em 1984, nos Estados Unidos, entrou em operação comercial a primeira usina solar de coletores cilíndricos parabólicos SEGS (*Solar Electric Generating System*). O projeto foi construído em Daggett, na Califórnia, pela *Luz International Limited*, a partir de contratos de compra de energia firmados com a companhia *Southern California Edison* (SCE). A SEGS I possuía 13,8MW de capacidade instalada e seu campo solar abrangia 82.960m², (SOLAR TROUGH, 2013). Uma vista das usinas SEGS está apresentada na Figura 03.

Figura 03 – Usina Solar Termoelétrica de Coletores Cilíndricos Parabólicos SEGS.



O sistema SEGS é formado por nove usinas de coletores cilíndricos parabólicos de foco linear que totalizam 354MWe de capacidade instalada. As usinas estão localizadas em três diferentes regiões do Deserto de Mojave, na Califórnia: *Daggett*, *Kramer Junction* e *Harper Lake*. Fonte: TIBA et al., (2012).

No início da **década de 90**, a companhia *Luz International Limited* havia instalado nove usinas SEGS para operações comerciais (SEGS I com 13,8MW; SEGS II, III, IV, V, VI, VII com 30MW cada; SEGS VIII e IX, com 80MW cada), totalizando 354MWe. Entretanto, em 1991, a companhia decretou falência e não conseguiu construir sua décima usina. Embora muitos fatores tenham contribuído para isso, a questão principal, segundo RAGHEB (2011), foi o alto custo da tecnologia que dificultava a competitividade no custo da energia. As usinas SEGS foram, então, vendidas para grupos de investidores como projetos independentes.

Outro importante acontecimento desta década foi a instalação da torre de potência SOLAR II (10MW; EUA), que entrou em operação em 1996, demonstrando a viabilidade do armazenamento com sais fundidos. O armazenamento térmico com sais fundidos suprime a necessidade de caros trocadores de calor e diminui os custos totais de implantação da usina. A SOLAR II foi instalada em Barstow, na Califórnia, e substituiu a torre SOLAR I, que operava a 510°C usando vapor d'água como fluido térmico e óleo para armazenamento a 302°C máximos. Juntamente com a planta THEMIS, instalada na França, a torre de potência SOLAR II demonstrou a natureza despachável da energia elétrica para a rede em horários noturnos (FRAIDENRAICH e LYRA, 1995).

De modo geral, o período compreendido entre os anos de 1991 a 2007, o qual inclui a **década de 2000**, foi marcado pela interrupção da implantação dos sistemas comerciais de grande porte. Os principais projetos implantados neste período foram:

- a) Um disco parabólico com motor *Stirling* (150kW), em 2004, nos Laboratórios Sandia, nos Estados Unidos;
- b) Uma usina de concentradores cilíndricos parabólicos (1MW), em 2006, também nos Estados Unidos para fins de P&D.

A interrupção da implantação dos sistemas comerciais foi atrelada, sobretudo, a baixa dos preços dos combustíveis fósseis. Nos Estados Unidos, por exemplo, houve queda de investimentos no setor e as políticas de incentivo como o PURPA (*Public Utility Regulatory Policy Act*), frearam o desenvolvimento da tecnologia devido às mudanças nos contratos de compra de energia elétrica, (IEA, 2008).

Na Espanha, as políticas de incentivo contempladas pelo Decreto Real 2818/1998, que propôs procedimentos administrativos e condições específicas para beneficiar os projetos na área das fontes renováveis de energia, como, por exemplo, a tarifação diferenciada e acima do valor do mercado – tarifação *feed in*, sofreram mudanças repentinas devido à crise econômica na Europa e sua repercussão no País, acarretando o cancelamento de tarifas diferenciadas para diversas fontes, inclusive para os contratos já firmados.

Em 2004, o Decreto Real 436 foi implementado na Espanha e teve como principal objetivo sanar os problemas evidenciados com a aplicação do Decreto Real 2818/1998, como, por exemplo, manter a estabilização do *grid* em função do aumento da participação das fontes renováveis. O Decreto Real 436/2004 estabeleceu, entre outras medidas, incentivos para estimular a compra de 200MW de energia solar termoelétrica com tarifação garantida. Tais incentivos, em função da idade da instalação, eram de 300% da tarifa média de eletricidade para os primeiros 25 anos e de 240% após esse período.

De acordo com a IRENA (2013), a retomada dos projetos comerciais somente ocorreu a partir de 2007, principalmente nos Estados Unidos e na Espanha, como consequência de políticas energéticas e de incentivos que almejavam mitigar as emissões de dióxido de carbono (CO₂) no meio ambiente bem como diversificar a matriz energética dos países.

A partir de 2007 verificou-se o início da rampa de crescimento da comercialização dos projetos CSP, com a implantação da torre de potência PS10 (11MW) e da usina de coletores cilíndricos parabólicos NEVADA I (64MW), na Espanha. Estas duas instalações marcaram a retomada dos investimentos CSP na Europa e, sobretudo, cresceu a capacidade instalada na Espanha, impulsionada pelo Decreto Real 661/2007. Tal Decreto regulamentou, entre outros, a diminuição da capacidade máxima das usinas CSP para 50MW.

Em 2008, também na Espanha, foi implantada a usina solar de coletores cilíndricos parabólicos ANDASOL I, de 50MW. Neste período, nos Estados Unidos, foi instalada a primeira usina solar termoelétrica com tecnologia de concentração linear de Fresnel. A usina foi construída em Kimberlina (EUA) e tem capacidade instalada de 5MW. A Figura 04 ilustra vistas das usinas ANDASOL I (50MW; Espanha), PS10 (11MW; Espanha) e da usina construída em Kimberlina (5MW; EUA).

Figura 04 – Usina Solar Termoeétrica ANDASOL I, Usina de Concentradores Lineares de Fresnel de Kimberlina e Torre de Potência PS10.



ANDASOL I (50MW, Espanha).



Usina de Kimberlina (5MW, EUA).



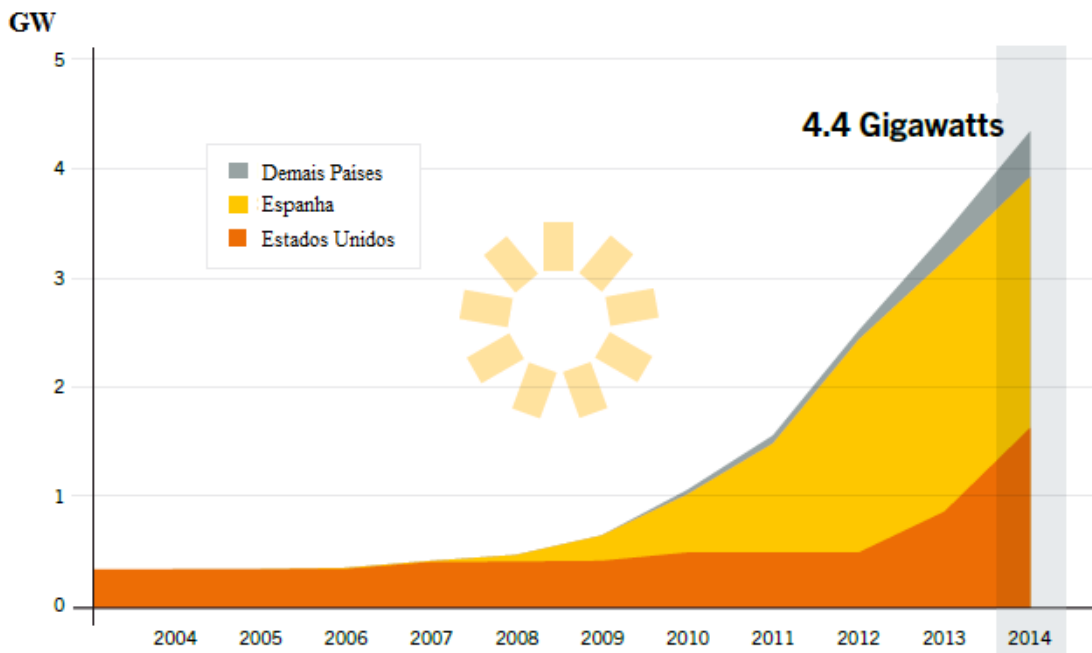
Torre de Potência PS10 (11MW, Espanha).

Fonte: TIBA et al., (2012).

Nos anos de 2009 e 2010 mais usinas foram instaladas: Na Espanha foram construídas as usinas PS20 (20MW; torre de potência), PUERTOLLANO, ANDASOL II e LA RISCA (50MW cada; usinas de coletores cilíndricos parabólicos) e PE1 (1,4MW, tecnologia de concentradores lineares de Fresnel). Já nos Estados Unidos, foi construída a usina SIERRA SUN TOWER (5MW; torre de potência), uma usina solar de coletores cilíndricos parabólicos com ciclo combinado, de 5MW, e uma planta de 1,5MW com a tecnologia de disco *Stirling*.

No final de 2014, a capacidade acumulada de usinas solares termoeétricas instaladas no mundo era de 4,4GW, com a predominância (95%) da tecnologia de coletores cilíndricos parabólicos (Figura 05). A Espanha e os Estados Unidos concentram a maior parte dos investimentos, porém em outros países, também houve implantação de usinas, principalmente nos Emirados Árabes Unidos e na Índia.

Figura 05 – Capacidade Acumulada das Usinas Solares Termoelétricas Instaladas no Mundo no Final de 2014.



Capacidade acumulada das usinas solares termoelétricas instaladas no mundo. Entre os anos de 1991 e 2007 houve a interrupção dos sistemas comerciais de grande porte. O ano de 2007 marca o retorno dos investimentos no setor e o início do crescimento da rampa de comercialização. No final de 2014, a capacidade acumulada no mundo foi de 4,4GW, com predominância das usinas de coletores cilíndricos parabólicos (95%).

Fonte Adaptada: REN21 (2015).

Com 2.304MW de capacidade instalada, a Espanha lidera o mercado mundial da tecnologia CSP. Neste *ranking*, os Estados Unidos surgem em segundo lugar com 1.650MW instalados (900MW instalados até o final de 2013 e 750MW adicionados no início de 2014).

Nos outros países, a instalação de projetos CSP em larga escala ocorreu nos Emirados Árabes Unidos e na Índia, mas novas construções também têm sido encontradas na África do Sul e no Marrocos. Pequenos campos solares, muitas vezes integrados com plantas que usam combustíveis fósseis, também são encontrados no Egito, Itália, Austrália, Argélia, Marrocos e no Irã.

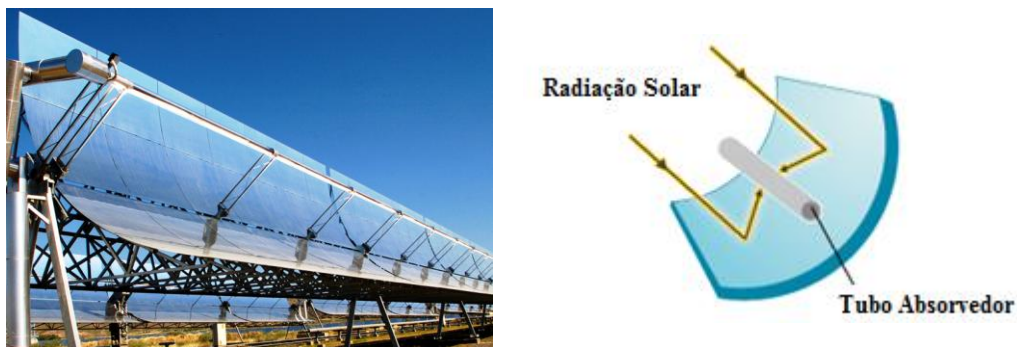
Segundo IEA (2014), a tecnologia CSP poderá fornecer 11% da demanda mundial de eletricidade no ano de 2050, em um cenário do tipo *hi-Ren* (*High Renewables Scenario*), onde as tecnologias renováveis (usinas CSP, eólicas e fotovoltaicas) representariam os principais agentes para a redução das emissões de dióxido de carbono no meio ambiente. Entretanto, para atingir essa meta de 11%, a Agência Internacional de Energia (IEA) aponta que seria necessário dispor de um acelerado crescimento da tecnologia CSP nos próximos anos.

2.1.2 Descrição da Tecnologia

2.1.2.1 Tecnologia de Coletores Cilíndricos Parabólicos

Segundo DUFFIE e BECKMAN (2006), os coletores cilíndricos parabólicos utilizam superfícies espelhadas para refletir toda a radiação solar incidente em seu plano de abertura para o foco, onde está localizado o tubo absorvedor (Figura 06). Este tubo recebe a radiação concentrada e transfere esta energia, sob a forma de calor, para um fluido de transferência de calor.

Figura 06 – Ilustração Esquemática de um Coletor Cilíndrico Parabólico.



Fonte: IEA (2014).

Os principais componentes do coletor cilíndrico parabólico são: o tubo absorvedor (ou receptor), os espelhos de vidro, o sistema de rastreamento solar e a estrutura de suporte.

O **tubo absorvedor** é constituído por um tubo de aço inoxidável e encoberto por um cilindro de vidro, ambos concêntricos. O tubo de aço inoxidável possui um recobrimento seletivo (geralmente misturas de cerâmica com metal - *Cermet*) que confere alta absorção da radiação no espectro solar e baixa emissividade de radiação infravermelha. Por outro lado, o cilindro de vidro tem alta transmitância. O espaço entre as duas superfícies é evacuado para reduzir as perdas térmicas para o ambiente.

Os dois tubos apresentam ainda um componente que permeia as paredes do vidro e do aço inoxidável dentro do espaço evacuado, as Esponjas Químicas (*Getters*). A função dessas esponjas é absorver as moléculas de gases, como o hidrogênio, originárias das degradações do fluido de transferência de calor, a altas temperaturas.

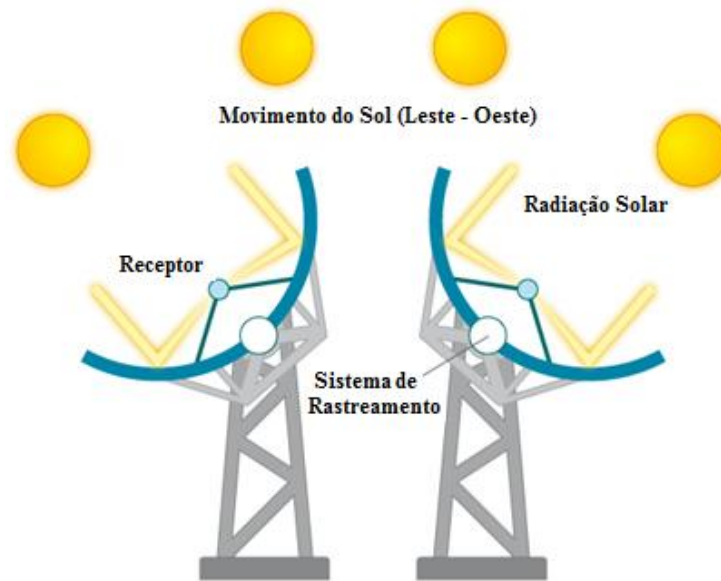
No interior do tubo absorvedor circula o fluido de transferência de calor (HTF – *Heat Transfer Fluid*). O fluido mais utilizado nas usinas de coletores parabólicos é o óleo sintético (*Therminol VP-1*) que apresenta temperatura máxima de trabalho de 400°C e ponto de fusão de 12°C. A principal limitação do uso do óleo sintético como fluido de transferência de calor é a temperatura máxima que este pode atingir (400°C), pois a partir deste valor, o óleo se degrada. Estudos têm sido realizados para substituir o óleo sintético por outros elementos. Alguns candidatos são: o uso de sais fundidos e a geração direta de vapor (DSG – *Direct Steam Generation*), que substituiria o fluido de trabalho por água. O principal desafio do uso do DSG nas usinas solares é o desenvolvimento de materiais capazes de suportar as elevadas pressões que o vapor gerado de forma direta exerceria no tubo absorvedor, além do desafio imposto pelo escoamento multifásico, especialmente para o armazenamento da energia.

Os **espelhos de vidro** são o tipo mais comum de refletores usados nas usinas solares termoeletricas. Os espelhos têm como material refletor a prata e apresentam alta durabilidade e alta refletividade ($\rho > 95,5\%$). Segundo FLABEG (2013) alguns fabricantes conseguem obter um fator de precisão geométrica de 99,9%, para cada espelho individual, na reflexão da radiação solar para o tubo absorvedor.

Um dos fatores que minimiza a refletividade dos espelhos nos coletores solares é o acúmulo de sujeira, sobretudo a poeira, por isso, ações de limpeza periódica nos espelhos são indispensáveis. Para ZARZA (2003) a sujeira acumulada nos espelhos pode reduzir em até 2% sua refletividade no período de um dia.

O **sistema de rastreamento solar** proporciona o alinhamento dos coletores com o Sol, permitindo assim maior coleção da energia. A configuração mais usada nas usinas de com concentradores cilíndricos parabólicos é o alinhamento dos coletores no eixo Norte-Sul, possibilitando o rastreamento solar segundo o eixo Leste-Oeste (Figura 07). Essa orientação tem os maiores ângulos de incidência ao meio-dia e, portanto, as maiores perdas de térmicas nesta fase do dia. Em contrapartida, o coletor aponta mais diretamente para o Sol no início do dia e no final da tarde, apresentando, assim, maior coleção de energia.

Figura 07 – Ilustração do Sistema de Rastreamento Solar do Coletor Cilíndrico Parabólico.



Coletor parabólico alinhado sobre o eixo Norte-Sul, possibilitando o rastreamento solar na direção Leste-Oeste. Este sentido de rastreamento é o mais utilizado nas usinas solares. Fonte: KALOGIROU (2009).

A **estrutura de suporte dos coletores** é responsável pela sustentação do sistema e deve suportar também as cargas de vento, especialmente na primeira linha de coletores que recebe o vento de campo aberto. As bases de sustentação do coletor são, geralmente, de concreto armado e sua estrutura de sustentação metálica, formada por estruturas de treliças.

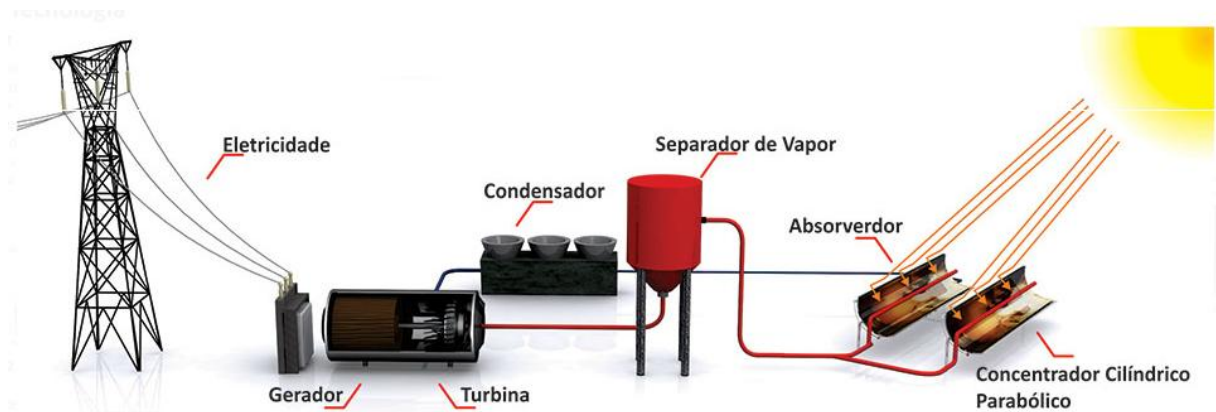
Dentre todas as tecnologias da energia solar concentrada (coletor cilíndrico parabólico, refletor linear de Fresnel, torres de potência e disco parabólico), os coletores parabólicos são, sem dúvida, a tecnologia mais madura e com maior capacidade instalada em operação. De acordo com a REN21 (2015), o percentual da capacidade instalada desta tecnologia no final de 2014 era de 95%, enquanto que, a torre de potência e os refletores lineares de Fresnel somaram 15% de participação. Os discos parabólicos não tiveram representação.

Para os próximos anos, estima-se que a tecnologia de coletores parabólicos apresente ainda forte crescimento, o qual deverá ser impulsionado, sobretudo, pela redução nos custos de implantação da usina solar, avanços tecnológicos em seus componentes (concentradores, receptores, armazenadores térmicos e fluidos de transferência de calor) e pela implantação de projetos de grande potência (economia de escala).

2.1.2.2 Usina Solar Termoelétrica de Coletores Cilíndricos Parabólicos

Segundo TIBA et. al., (2012) uma usina solar termoelétrica de coletores parabólicos é formada pelos seguintes componentes: a) o coletor solar que, mediante a reflexão ou difração da luz, realiza sua coleta e concentração; b) o tubo absorvedor que absorve a luz e transfere o calor para um fluido térmico; c) um sistema gerador de vapor; e d) um sistema convencional de conversão de energia térmica em eletricidade, como mostrado na Figura 08.

Figura 08 – Esquema de Usina Solar Termoelétrica de Coletores Cilíndricos Parabólicos.

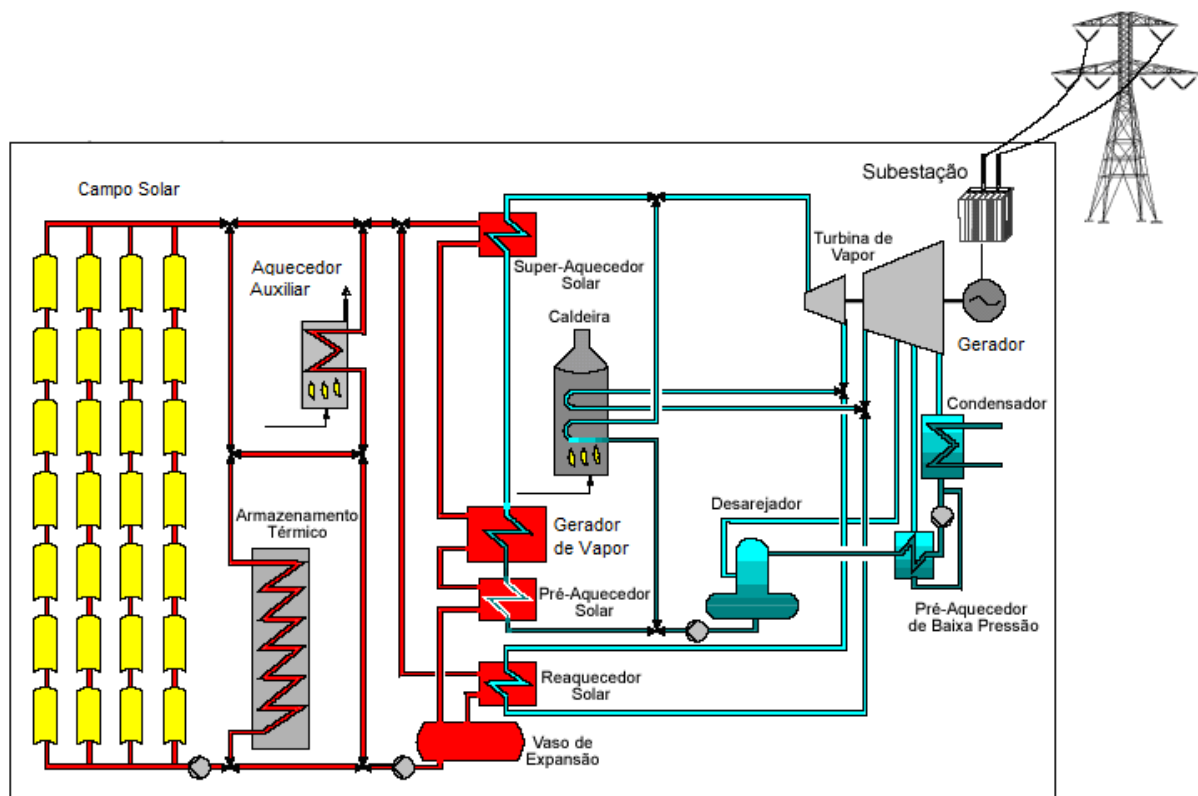


Nas usinas de coletores parabólicos, a produção de energia elétrica é feita a partir da concentração da radiação solar a altas temperaturas. Por meio da conversão térmico-mecânica e uso de dispositivos adequados, essa radiação é convertida em eletricidade e pode ser ligada com a rede de energia. Fonte: TIBA et al., (2012).

Os coletores solares são dispostos linearmente no campo solar e captam a radiação solar incidente em sua superfície, refletindo-a para o tubo absorvedor. No interior deste tubo, está o fluido de transferência de calor e, na medida em que circula pelos tubos absorvedores, esse fluido é aquecido e bombeado através de uma série de trocadores de calor para um sistema de geração de vapor, onde é gerado vapor superaquecido. O fluido, então, retorna ao sistema e o vapor superaquecido aciona um sistema convencional de conversão de energia térmica em eletricidade, produzindo a energia elétrica. O vapor é depois condensado e retorna aos trocadores de calor, repetindo o ciclo.

As usinas solares termoeletricas priorizam a fonte solar como fonte primária para a geração de energia elétrica, contudo, nos períodos de baixa intensidade de radiação solar (que ocorrem quando os dias estão nublados ou à noite), a usina necessita de suprimento energético externo. Uma forma de complementar a geração de eletricidade nesses períodos é a utilização de **sistemas de armazenamento térmico**. Os armazenadores térmicos conservam o excesso de calor que é coletado durante o dia no campo solar e o lança no sistema de geração de vapor da usina quando a produção de eletricidade é requerida. Um diagrama ilustrativo de uma usina SEGS que dispõe de armazenamento térmico é apresentado na Figura 09.

Figura 09 – Diagrama Ilustrativo de Usina SEGS com Armazenadores Térmicos.

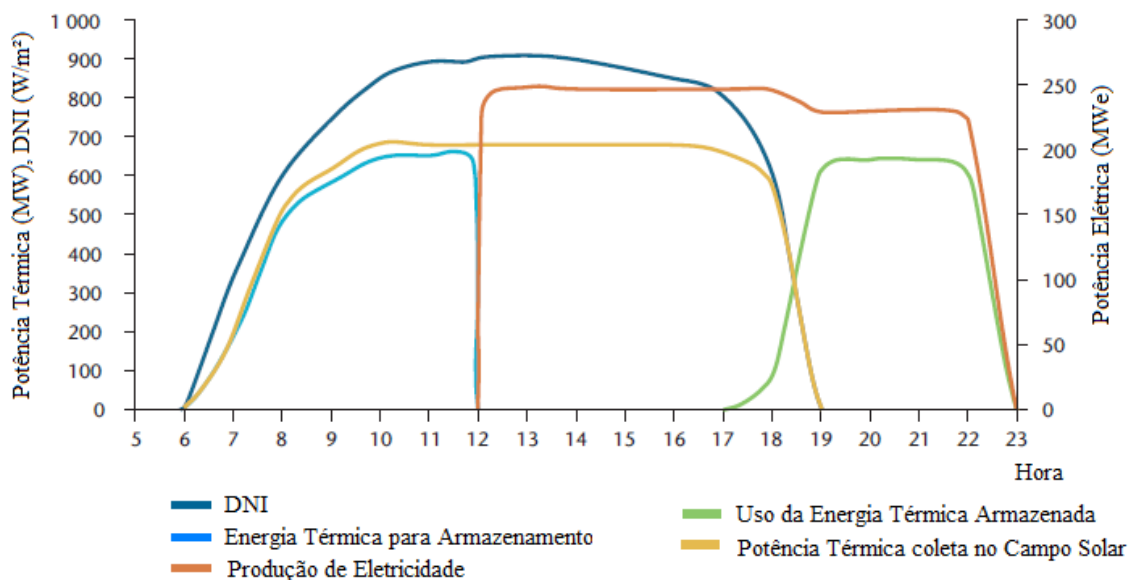


Fonte Adaptada: SOLAR TROUGH (2013).

A Figura 09 ilustra a configuração típica de uma usina SEGS que dispõe de sistema de armazenamento térmico. Tal sistema traz maior robustez para o despacho termelétrico da usina. Ainda nesta figura são mostrados os equipamentos *boiler* e o aquecedor para o fluido, ambos opcionais, para a operação híbrida da usina solar por meio do uso do gás natural, (SOLAR TROUGH, 2013).

De acordo com a IEA (2014) o uso de armazenadores térmicos propicia o aumento do fator de capacidade da usina solar bem como melhora seu tempo de operação, já que suaviza os efeitos das variações da radiação solar direta normal durante o dia. Um esquema dessa suavização é apresentado na Figura 10, que expõe a utilização do armazenamento térmico numa usina CSP de 250MW.

Figura 10 – Esquema da Utilização de Armazenadores Térmicos em uma Usina CSP de 250MW de Capacidade Instalada.



Na escala da esquerda estão indicados o valor da Radiação Solar Direta Normal (DNI – *Direct Normal Irradiation*) e o valor da Potência Térmica gerada no campo solar, para fins de armazenamento e geração de eletricidade. Na escala da direita está mostrada a Potência Elétrica gerada em uma usina CSP de 250MW de capacidade instalada. Fonte Adaptada: IEA (2014).

Da Figura 10, é possível perceber que a radiação solar direta (curva em azul escuro) inicia-se às 6h da manhã e finaliza às 19h. Acompanhando este perfil está a energia térmica gerada no campo solar (curva em laranja), ou seja, a produção de energia térmica também se inicia às 6h da manhã e finaliza às 19h. No período da manhã (6h - 12h) uma parte da energia térmica gerada no campo solar é armazenada (curva em azul claro). No final deste período, às 12h, a usina começa a produzir eletricidade (curva em vermelho). Quando a radiação solar não apresenta índices satisfatórios para a produção de energia (por volta das 17h) e não há mais radiação solar disponível (após as 19h), a geração de eletricidade continua na usina, utilizando o calor previamente armazenado, e se estende até as 23 horas.

Importante notar que, além do modo de uso mostrado na Figura 10, os armazenadores térmicos podem também ser utilizados de outras duas formas: a) a *geração maximizada para atender ao horário de pico*, que ocorre quando todo o calor coletado no campo solar durante a manhã é armazenado e a produção de eletricidade é feita entre as 12h e às 18h para atender a demanda em plena carga, e a *geração estendida* que ocorre quando há uma grande área de coletores, o que possibilita a operação da turbina na condição nominal durante um intervalo maior de tempo. Neste uso, a energia térmica para armazenamento é coletada por volta das 7h da manhã até às 18h, aproximadamente. No início da noite, a energia térmica armazenada é enviada para o bloco de potência. Durante a noite, o sistema de armazenamento atinge seu máximo desempenho e a usina pode seguir funcionando por mais horas após o pôr do Sol, até que toda a energia armazenada seja completamente extraída. Neste modo de uso a produção de eletricidade na usina inicia-se às 5:30h e finaliza às 22:30h, usando a energia solar.

Um sistema de armazenamento foi instalado na planta SEGS I para suprir 3 horas de plena capacidade, mas armazenadores térmicos não foram incorporados nas SEGS posteriores por razões de custos, (ROLIM, 2007). Nos dias atuais, esses sistemas também foram inseridos em algumas usinas dos EUA. Na Espanha, 40% das usinas solares termoeletricas instaladas desde o ano de 2006, dispõem de armazenadores térmicos.

Outra possibilidade de suprimento para a geração de energia elétrica nas usinas solares é a **hibridização** com outros combustíveis, denominados combustíveis *backup*. Um exemplo é a utilização de caldeiras auxiliares, que está mostrada também na Figura 09.

Com o uso de caldeiras auxiliares, é possível complementar a produção de energia térmica para garantir o fornecimento de vapor durante o *startup* da planta. Em países onde o inverno atinge temperaturas negativas, o uso de caldeiras auxiliares também é preciso para o fornecimento de vapor para proteger equipamentos do congelamento, (TURCHI, 2010).

O processo de hibridização pode também ocorrer com a integração de um campo solar a uma usina termoeletrica que utiliza turbina a gás em um ciclo combinado. Esta integração é denominada de ISCC - *Integrated Solar Combined Cycle*. O ISCC usa a energia térmica do campo solar para elevar a temperatura dos exaustos da turbina a gás e suplementar a produção de eletricidade na usina. Deste modo, a energia solar é usada para gerar vapor adicional e os exaustos da turbina a gás são utilizados para gerar vapor pré-aquecido e superaquecido.

Segundo IEA (2014) quase todas as usinas solares termoeletricas instaladas no mundo usam combustível fóssil, como *backup*, para manter a natureza despachável da energia. As SEGS, por exemplo, utilizam gás natural para produzir 25% da energia primária. Na Espanha, o gás natural também é usado como *backup*, mas esse percentual é limitado a 12% ou 15%.

A usina SHAMS-1, de 100MW, instalada nos Emirados Árabes Unidos, também faz uso da hibridização com gás natural. A planta de gás natural opera durante todo o dia para aumentar a temperatura do vapor (de 380°C para 540°C) visando à ótima operação da turbina. Devido a esse uso contínuo, o gás natural é responsável por apenas 18% da produção geral da usina nos momentos de pico.

2.1.3 Radiação Solar

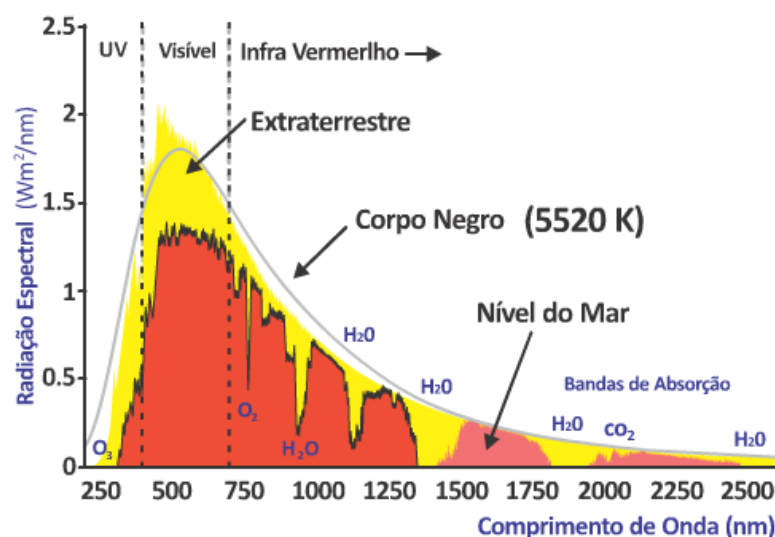
2.1.3.1 Espectro Solar

A Energia Solar é a fonte de energia mais abundante da Terra, com 885 milhões de TWh, aproximadamente, atingindo a superfície terrestre a cada ano, (IEA, 2014).

A radiação solar pode ser modelada com boa precisão considerando o Sol como corpo negro que emite uma temperatura de 5.860K. No topo da atmosfera terrestre, o espectro solar é bastante definido dadas a temperatura do corpo (Lei de Stefan-Boltzmann) e a distância Terra-Sol (atenuação seguindo a lei do inverso do quadrado da distância). O valor da radiação solar extraterrestre é, aproximadamente, 1.366W/m² a uma distância Terra-Sol igual a 1 UA (Unidade Astronômica), (TIBA et al., 2012).

O espectro solar extraterrestre e na superfície terrestre estão expostos na Figura 11.

Figura 11 – Espectro Solar Extraterrestre e na Superfície Terrestre.



Espectro Solar Extraterrestre e Terrestre: o espectro extraterrestre está representado pelo amarelo enquanto que o espectro modelado extraterrestre e o terrestre estão representados por vermelho. Fonte: TIBA et al., (2012).

Da Figura 11, observa-se que na região do ultravioleta (UV) e infravermelho próximo (IV_{prox}) há forte absorção do ozônio (O_3). E absorção de vapor d'água e CO_2 , nas regiões do infravermelho (IV) e infravermelho próximo (IV_{prox}).

A radiação solar que atinge a superfície da Terra ao interagir com a atmosfera, sofre reações de absorção e espalhamento de fótons com os constituintes da atmosfera de tal forma que o espectro solar resultante na superfície terrestre dependerá da concentração e também da configuração espacial e temporal destes constituintes, e será de natureza estocástica. Como resultado desta interação, ocorre a desagregação da radiação solar nas componentes direta e difusa, (TIBA et al., 2012).

A **radiação direta** é aquela recebida na superfície terrestre sem perturbações, ou seja, não sofre espalhamento atmosférico. Por outro lado, a **radiação difusa** sofre espalhamentos atmosféricos de tal forma que uma porção retorna para o espaço e a outra atinge a superfície terrestre. A radiação solar incidente sobre a superfície terrestre é a soma das componentes, direta e difusa, sendo denominada de **radiação global ou radiação total**.

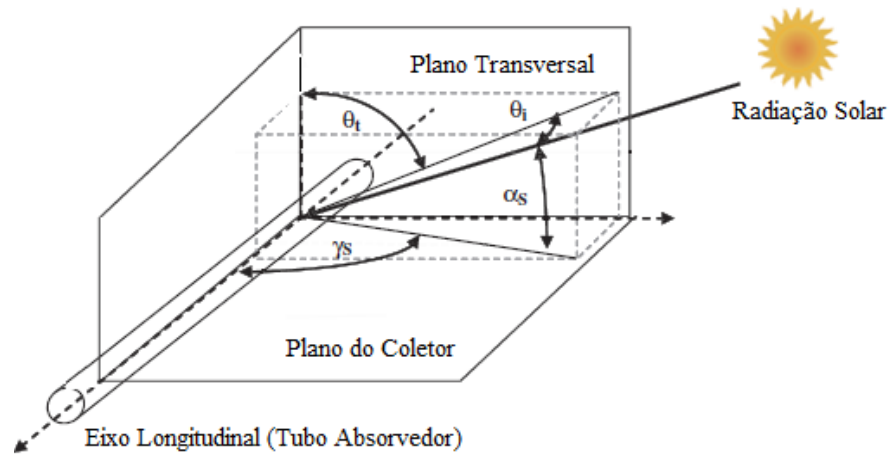
2.1.3.2 Parâmetros Geométricos e a Posição do Sol

Uma questão importante para estimar a radiação solar incidente em uma determinada localidade é o conhecimento da posição do Sol. Segundo MORIN et al., (2012) dois ângulos especificam a posição do Sol em uma dada localidade: o ângulo de elevação do Sol (α_s) e o azimute solar (γ_s).

O ângulo de elevação do Sol (α_s), ou altitude solar, é o ângulo formado entre o plano horizontal e a linha do Sol, podendo variar de 0° (horizonte) a 90° (zênite). É o complemento do ângulo zenital; O azimute solar (γ_s), por sua vez, é o ângulo formado entre a projeção dos raios do Sol no plano horizontal e o eixo Norte-Sul. Este ângulo é contado a partir do Sul e assume os valores de 0° no Sul, -90° a Oeste, e $+90^\circ$ a Leste, DUFFIE e BECKMAN (1991).

Os ângulos α_s e γ_s são essenciais para a definição do ângulo de incidência da radiação solar (θ), que representa o ângulo entre a radiação solar direta na superfície e o plano normal a esta superfície, cuja projeção no plano resulta nos ângulos de incidência longitudinal (θ_i) e transversal (θ_t) conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Definição dos Ângulos Usados nos Cálculos Ópticos.



Ângulos usados nos cálculos ópticos para cilíndrico parabólico alinhado horizontalmente e eixo paralelo a direção Norte-Sul: azimute solar (γ_s), ângulo de elevação do Sol (α_s), ângulo de incidência longitudinal (θ_i) e ângulo de incidência transversal (θ_t). Fonte Adaptada: MORIN et al., (2012).

O ângulo de incidência da radiação solar varia ao longo do dia (e também ao longo do ano) e está relacionado ao desempenho dos coletores solares. Segundo KALOGIROU (2009), a partir de seu conhecimento é possível projetar a correta orientação dos coletores solares, assim como sua localização, evitando sombreamento e obtendo-se os melhores ganhos.

O ângulo de incidência no plano transversal (θ_t) e o ângulo de incidência longitudinal (θ_i) são dados, respectivamente, pelas Equações 01 e 02.

$$\theta_t = \arctan \left[\frac{|\sin(\gamma_s)|}{\tan(\alpha_s)} \right] \quad (\text{Eq. 01})$$

$$\theta_i = \arcsin [\cos(\gamma_s)\cos(\alpha_s)] \quad (\text{Eq. 02})$$

Importante salientar que as Equações 01 e 02 somente são válidas os coletores alinhados horizontalmente, com eixo paralelo a direção Norte-Sul.

2.1.4 Modelo Óptico e Térmico da Usina Solar

A energia elétrica gerada por uma usina solar de coletores parabólicos, de 80MW, tipo SEGS, pode ser determinada por uma função matemática que considera a energia térmica gerada pela usina, a eficiência nominal do ciclo de potência, o comportamento parcial das cargas e o consumo elétrico parasitário no campo solar e no bloco de potência da usina, BROESAMLE et al., (2001).

Segundo MORIN et al., (2012) a determinação da **energia térmica gerada no campo solar** de uma usina de coletores parabólicos pode ser feita a partir da diferença da energia total absorvida e as perdas térmicas, conforme mostra a Equação 03:

$$\dot{Q}_{\text{field}} = \dot{Q}_{\text{inc}} - \dot{Q}_{\text{loss}} \quad (\text{Eq. 03})$$

Onde:

$\dot{Q}_{\text{field}}$ = é a energia térmica gerada no campo solar;

$\dot{Q}_{\text{inc}}$ = é energia total absorvida;

$\dot{Q}_{\text{loss}}$ = é o fator que representa as perdas térmicas.

A energia total absorvida no campo solar ($\dot{Q}_{\text{inc}}$) pode ser calculada por:

$$\dot{Q}_{\text{inc}} = \eta_{\text{opt},0} \cdot \eta_{\text{shadow}} \cdot \eta_{\text{endloss}} \cdot K \cdot Cl \cdot x_{\text{field}} \cdot \text{DNI} \cdot A_{\text{SF}} \quad (\text{Eq. 04})$$

Onde:

$\eta_{\text{opt},0}$ = é a eficiência óptica máxima do coletor;

η_{shadow} = refere-se às perdas por sombreamento do coletor;

η_{endloss} = refere-se às perdas na extremidade do coletor;

K = representas as perdas devido ao modificador do ângulo de incidência;

Cl = relativo à limpeza dos espelhos.

x_{field} = representa a disponibilidade do campo solar;

DNI = é a radiação solar direta normal (*Direct Normal Irradiation*);

A_{SF} = representa a área total de abertura do coletor no campo solar.

A **eficiência óptica** (η_{opt}) representa as perdas ópticas existentes nos coletores solares, as quais provêm da reflexão, transmissão e absorção não ideal da radiação solar. De acordo com RICHTS (2012), tal eficiência pode ser considerada como uma constante na modelagem do sistema, podendo ser expressa por (valor máximo):

$$\eta_{opt} = \varepsilon_T \vartheta \mu \rho_m \sigma_T \tau = 0,7329 \quad (\text{Eq. 05})$$

Onde:

ε_T = perdas relativas à reflexão dos espelhos uma vez que nem toda a radiação solar incidente é refletida ($\varepsilon_T = 0,93$);

ϑ = fator relativo à sujeira na superfície dos espelhos ($\vartheta = 0,98$);

μ = perdas relativas à transmitância dos espelhos, onde sua cobertura absorve uma parcela da radiação solar incidente ($\mu = 0,99$);

ρ_m = fator de interceptação, relacionado com a fabricação dos espelhos ($\rho_m = 0,90$);

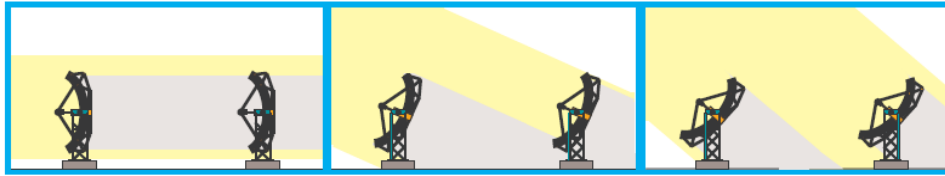
σ_T = fator de transmitância que envolve o tubo absorvedor, devido ao tubo de vidro que protege o tubo absorvedor ($\sigma_T = 0,95$);

τ = coeficiente de absorção do tubo absorvedor, devido à parcela de radiação que é refletida pelo tubo ($\tau = 0,95$).

Diferentes valores para a eficiência máxima do coletor solar são encontrados na literatura. De acordo com PATNODE (2006), a eficiência óptica máxima do coletor pode ser representada pelo valor constante de $\eta_{opt} = 0,7133$. Para GARCÍA et al., (2011), tal eficiência pode ser dada por $\eta_{opt} = 0,8100$. Ainda, para SHENCK e ECK (2012), o valor máximo obtido para a eficiência óptica é dado por $\eta_{opt} = 0,7330$.

As **perdas relacionadas ao sombreamento** (η_{shadow}) ocorrem nos períodos em que o ângulo de elevação do Sol apresenta valores baixos, causando sombreamento nos coletores dispostos no campo solar da usina. Tal efeito diminui o desempenho dos coletores solares uma vez que atenua a coleção de radiação solar. Uma ilustração do efeito do sombreamento no campo de coletores solares é mostrada na Figura 13.

Figura 13 – Ilustração das Perdas Relacionadas ao Sombreamento nos Coletores.



Devido aos baixos valores do ângulo de elevação do sol no início da manhã, as colunas de coletores localizadas mais a Leste receberão por completo os raios de sol, causando sombreamento nas colunas subsequentes localizadas mais a Oeste. Como o movimento do sol, o efeito do sombreamento nas colunas decresce até atingir o ângulo zenital crítico, onde nenhum sombreamento ocorre. Os coletores permanecem sem qualquer sombreamento até meados do dia, quando o efeito do sombreamento reaparece no período vespertino uma vez que o ângulo de elevação do sol apresenta novamente valores baixos. Fonte: PATNODE (2006).

Para MORIN et al., (2012), o valor das perdas relacionadas ao sombreamento está compreendido no intervalo de zero (quando as colunas estão completamente sombreadas) a um (quando as colunas não estão sombreadas), podendo ser obtido por:

$$\begin{aligned}\eta_{\text{shadow}} &= RW \cos(\theta_t), \text{ for } 0 \leq RW \cos(\theta_t) < 1 \\ \eta_{\text{shadow}} &= 1, \text{ for } RW \cos(\theta_t) \geq 1; \\ \eta_{\text{shadow}} &= 0, \text{ for } RW \cos(\theta_t) < 0\end{aligned}\tag{Eq. 06}$$

Onde:

RW = distância entre as colunas, definida em função da abertura do coletor solar ($RW=3m$);

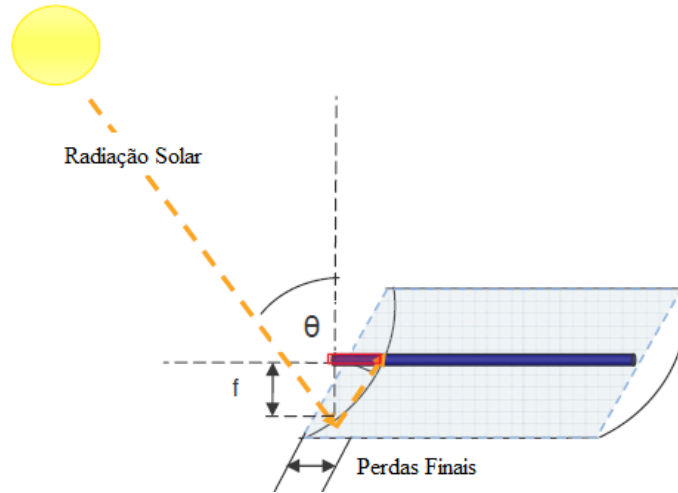
θ_t = ângulo de incidência transversal.

As **perdas nas extremidades do coletor** (η_{endloss}) compreendem a fração de luz solar que é refletida pelo coletor e não ilumina certo comprimento do tubo absorvedor. Tais perdas são dadas em função do comprimento focal do coletor ($l_{\text{focal}} = 1,71m$), do comprimento do coletor ($l_{\text{Coll}} = 150m$) e do ângulo de incidência longitudinal (θ_i), como mostra a Equação 07:

$$\eta_{\text{endloss}} = 1 - \frac{l_{\text{focal}} \tan(\theta_i)}{l_{\text{Coll}}}\tag{Eq. 07}$$

Uma ilustração do fator de perdas nas extremidades do coletor solar está apresentada na Figura 14.

Figura 14 – Ilustração do Fator de Perdas nas Extremidades do Coletor Solar.



Fonte Adaptada: PATNODE (2006).

As **perdas relacionadas ao modificador do ângulo de incidência** (K) consideram a distorção na imagem refletida devido à incidência não perpendicular da radiação. De acordo com MORIN et al., (2012) o modificador do ângulo de incidência é dado por:

$$K = \cos(\theta_i) - 0,000525 \cdot \theta_i - 0,0000286 \cdot \theta_i^2 \quad (\text{Eq. 08})$$

Onde:

θ_i = ângulo de incidência longitudinal (medido em graus).

Para PATNODE (2006) é importante distinguir as perdas existentes na radiação solar disponível devido ao ângulo de incidência das correções (empíricas) de absorção e reflexão correlacionadas ao ângulo de incidência. Para tanto, é necessário dividir o modificador do ângulo de incidência definido por Dudley pelo cosseno do ângulo de incidência, como mostram as seguintes equações:

$$K = \frac{K}{\cos(\theta)} \quad (\text{Eq. 09})$$

$$K = 1 + 0,000525 \frac{\theta_i}{\cos(\theta)} - 0,0000286 \frac{\theta_i^2}{\cos(\theta)} \quad (\text{Eq. 10})$$

O modelo para a definição das **perdas térmicas** ($\dot{Q}_{\text{loss}}$) é derivado daquele proposto por DUDLEY (1994):

$$\dot{Q}_{\text{loss}} = [(b_1 \Delta T + b_2 \Delta T^2) + q_{\text{pipeloss}}] \cdot A_{\text{SF}} \quad (\text{Eq. 11})$$

Onde:

b_1, b_2 = coeficientes do coletor *EuroTrough II* ($b_1 = 0 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $b_2 = 0,00047 \text{ W/m}^2\text{K}^2$);

q_{pipeloss} = perdas térmicas adicionais existentes nas tubulações do campo solar;

A_{SF} = área total de abertura do coletor no campo solar.

A diferença de temperatura entre a temperatura média do fluido no campo solar e a temperatura ambiente (ΔT) pode ser dada pela seguinte expressão:

$$\Delta T = \frac{T_{f,\text{in}} + T_{f,\text{out}}}{2} - T_{\text{amb}} \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde:

$T_{f,\text{in}}$ = temperatura do fluido na entrada do campo solar;

$T_{f,\text{out}}$ = temperatura do fluido na saída do campo solar;

T_{amb} = temperatura ambiente.

Uma vez modelada a geração de energia térmica no campo solar da usina, o **cálculo da produção de eletricidade** (P_{net}) pode ser dado por (BROESAMLE et al., 2001):

$$P_{\text{net}} = \dot{Q}_{\text{field}} \cdot \eta_{\text{nom}} \cdot \left[\frac{\dot{Q}_{\text{field}}}{\dot{Q}_{\text{field,nom}}} \right]^k - P_{\text{Par,SF}} - P_{\text{Par,PB}} \quad (\text{Eq. 13})$$

Onde:

$\dot{Q}_{\text{field}}$ = energia térmica gerada no campo solar;

η_{nom} = eficiência nominal do ciclo de potência;

$\dot{Q}_{\text{field,nom}}$ = energia térmica nominal do campo solar;

k = descreve o comportamento parcial das cargas no ciclo de potência;

$P_{\text{Par,SF}}$ = representa o consumo elétrico parasitário do campo solar;

$P_{\text{Par,PB}}$ = consumo elétrico parasitário do ciclo de potência.

2.1.5 Análise Econômica LCOE

De acordo com IEA (2014) os custos mais representativos existentes nas usinas CSP estão relacionados às implementações do campo solar, do bloco de potência e dos sistemas de armazenamento térmico (se houver) e de transferência de calor da usina (fluido de trabalho).

Os custos de capital de uma usina solar de coletores parabólicos sem armazenadores térmico são da ordem de US\$ 4000/kW, e possui fator de capacidade variando de 20% a 25%. Adicionando 6 horas de armazenamento térmico a este sistema, o custo de capital aumenta e varia de US\$ 7000/kW a US\$ 9000/kW, com o dobro do fator de capacidade. Por outro lado, os custos de operação e manutenção ($C_{O\&M}$), que incluem gastos com o combustível *backup* e gastos com o consumo de água para limpeza dos espelhos, resfriamento e alimentação do ciclo termodinâmico da usina solar, são da ordem de US\$ 50/MWh, (IEA, 2014).

Outra forma de avaliar o custo associado a usinas solares de coletores parabólicos é a partir do uso do custo nivelado da energia – *Levelised Cost Of Electricity* (LCOE). O LCOE representa o valor presente do custo total de construção e operação da usina solar num cenário financeiro com taxas de retorno do capital, e é expresso em termos de moeda real para fins de remoção da inflação.

De acordo com BROESAMLE et al., (2001) o custo nivelado da eletricidade (LCOE, C_{el}) gerada por usina CSP de coletores parabólicos que opera exclusivamente em modo solar depende, principalmente, do custo de investimento, do custo da infraestrutura necessária para a interligação elétrica, rodoviária e hídrica da usina, dos gastos anuais com operação e manutenção, do tempo de vida útil, da taxa de retorno do capital e da produção anual de energia elétrica, como mostram as equações 14, 15 e 16:

$$C_{el} = \frac{\frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \cdot (I_{plant} + I_{inf}) + C_{O\&M}}{E_{year}} \quad (\text{Eq. 14})$$

$$I_{inf} = C_{road} \cdot d_{road} + C_{htg} \cdot d_{dhtg} + C_p \cdot d_p \quad (\text{Eq. 15})$$

$$C_{O\&M} = C_{per} + 0,01 \cdot (I_{plant} + I_{inf}) \quad (\text{Eq. 16})$$

Onde:

C_{el} = custo de produção de eletricidade;

i = taxa de retorno do capital;

n = tempo de vida útil (anos);

I_{plant} = custo de investimento da usina;

I_{inf} = custo de infraestrutura para a ligação elétrica, hídrica e rodoviária da usina;

$C_{O\&M}$ = gastos anuais com operação e manutenção;

E_{year} = produção de energia elétrica anual;

C_{road} = custo necessário, por unidade de distância, para a interligação rodoviária;

d_{road} = distância em relação às rodovias;

C_{htg} = custo necessário, por unidade de distância, para a interligação elétrica;

d_{htg} = distância em relação às linhas de transmissão;

C_p = custo necessário, por unidade de distância, para a interligação hídrica;

d_p = distância em relação aos recursos hídricos;

C_{per} = custo com os trabalhadores.

2.1.5.1 Redução dos Custos da Tecnologia

Muito embora os custos associados com a implementação da tecnologia CSP tenham apresentado um decréscimo notável nos últimos anos, eles ainda são considerados elevados, dificultando que tal tecnologia, nos dias atuais, alcance a competitividade econômica.

Segundo o IEA (2014), no primeiro semestre de 2015 o LCOE médio de usinas CSP com armazenadores térmicos era da ordem de US\$168/MWh (mínimo de US\$ 146/MWh e máximo de US\$ 213/MWh). Em longo prazo, especificamente entre os anos de 2015 a 2050, espera-se que, o LCOE apresente redução de até 55%, em virtude da redução dos preços de capital da usina, ganhos na eficiência dos componentes e melhores condições no financiamento dos projetos. Uma projeção dos custos de redução do LCOE para usinas CSP com sistemas de armazenamento térmico, em um cenário de altos incentivos para a energia renovável, está na mostrada Tabela 01.

Tabela 01 – Projeção da Redução do LCOE para Usinas CSP com Armazenadores Térmicos num Cenário de Alto Incentivo às Renováveis (*hi-Ren Scenario*).

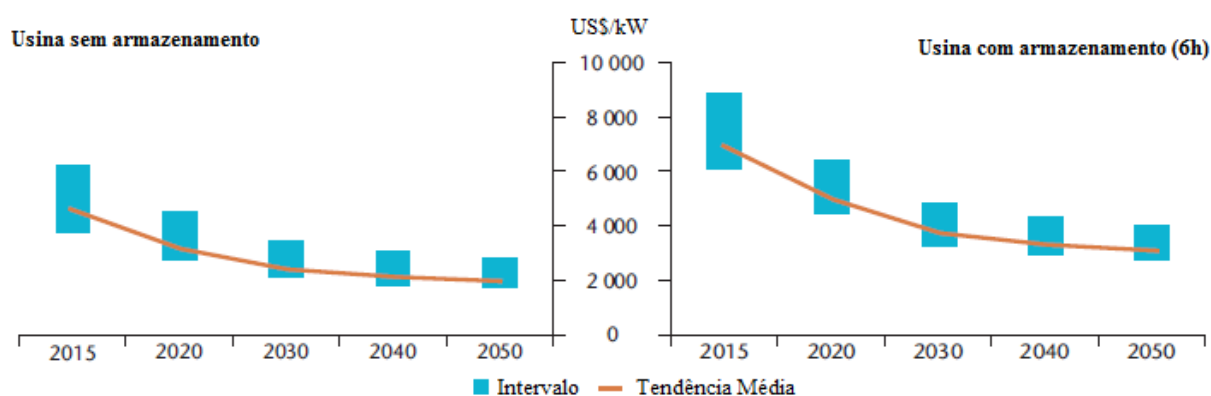
US\$/MWh	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Mínimo	146	116	96	86	72	69	66	64
Médio	168	130	109	98	80	77	72	71
Máximo	213	169	124	112	105	101	96	94

Fonte: IEA (2014).

Por outro lado, o cenário *Sunshot* do Departamento de Energia dos Estados Unidos – *Department of Energy* (DoE/EUA) é mais otimista e prevê a redução do LCOE para US\$ 60/MWh já no ano de 2020, (PITCHUMANI, 2013).

A Agência IEA aponta também que, especificamente para plantas CSP de coletores parabólicos com 6 horas de armazenamento, os custos de investimento (capital), no ano de 2050, em um cenário com alto incentivo às fontes renováveis (*hi-Ren scenario*) estarão definidos no intervalo de US\$ 2800kW a US\$ 4100kW, conforme ilustra a Figura 15.

Figura 15 – Projeção da Redução dos Custos de Investimento de uma Planta CSP



Fonte Adaptada: IEA (2014).

A Agência IEA aponta ainda que as tecnologias CSP irão atingir a competitividade econômica por diversos motivos. Dentre eles se destacam o avanço tecnológico nos sistemas de concentração (coletores, receptores, sistema de armazenamento e fluido de trabalho), o conhecimento adquirido com as tecnologias que apresentam maturidade comercial e a economia de escala que ocorre quando se instalam projetos de grande porte.

2.1.6 Estudos de Localização

Nos últimos anos, os estudos de localização de usinas solares se difundiram bastante em vários países do mundo, e apresentam como principal objetivo a identificação das áreas potenciais para a consolidação de projetos. Nesses estudos a identificação das áreas potenciais é feita, de modo geral, a partir de avaliações do potencial técnico, econômico e ambiental da geração de energia, numa dada região.

Para ARÁN CARRIÓN et al., (2008), a realização de estudos de localização é necessária para obter informações essenciais relativas à área em que se deseja instalar a usina solar, uma vez que tais informações proporcionam:

- Subsídios no processo de instalação da usina: quando evidenciam os locais com os maiores índices de radiação solar, fator primordial na geração de energia; ou quando apresentam as regiões com baixa declividade, o que reduz as despesas com a preparação do terreno, por exemplo;
- A redução de perdas relacionadas à transmissão de energia: quando se conhece a ligação da central às estações de distribuição para o consumo da energia;
- A percepção da necessidade de construir infraestruturas adicionais para a interligação elétrica, hídrica e ou rodoviária da usina solar;
- A redução dos efeitos que causam os impactos ambientais: quando análises de impacto ambiental na localidade são realizadas.

A linha de pesquisa mais utilizada para a localização das usinas solares é aquela que reúne os conceitos de ADM e SIG para a identificação das áreas aptas à instalação. Dentro deste contexto estão os trabalhos de ARÁN CARRIÓN et. al., (2008), CHARABI e GASTLI (2011), SÁNCHEZ-LOZANO et. al., (2013) e SÁNCHEZ-LOZANO et. al. (2014). Outra linha de pesquisa que também pode ser utilizada é a da localização pelo custo de produção de eletricidade, que apresenta como um dos trabalhos pioneiros, aquele realizado por BROESAMLE et. al., (2001). Uma apresentação sucinta de cada um destes trabalhos é mostrada a seguir.

2.1.6.1 Localização pelo Uso do Processo Analítico Hierárquico

Os estudos de localização de usinas solares realizados a partir do uso da ADM e do SIG apresentam, de modo geral, a construção de um Sistema de Suporte à Decisão Ambiental – *Environmental Decision-Support System* (EDSS) para a implantação de usinas solares. Um dos estudos pioneiros foi o apresentado por ARÁN CARRIÓN et. al., (2008).

O estudo de ARÁN CARRIÓN et. al., (2008) apresentou um EDSS para a instalação de usinas fotovoltaicas no distrito de Huéscar, localizado na província de Granada (Espanha). O estudo usou um modelo de ADM que considera o problema da localização de usinas solares como sendo de um objetivo (definir localização ótima para a instalação das usinas) e vários critérios (critérios de ordem ambiental, climático, entre outros). Dentro desse modelo, a técnica utilizada pelos autores para a localização das áreas aptas foi o Processo Analítico Hierárquico – *Analytic Hierarchy Process* (AHP).

Os critérios definidos no estudo foram classificados em quatro grupos: ambientais, climáticos, topográficos e de localização – este último relacionado à proximidade com as infraestruturas elétrica, rodoviária e hídrica. A regra de decisão adotada, a qual integra todos os critérios do estudo e define a ordem de importância para os mesmos visando atingir o objetivo proposto, definiu o critério climático como sendo o mais importante do estudo, seguido dos critérios topográfico, ambiental e de localização. A atribuição dos pesos para os critérios e subcritérios foi feito pelo método AHP.

Dos procedimentos matemáticos realizados a partir do uso do método AHP, o critério climático apresentou um peso de 58%, enquanto que, os critérios topográficos, ambiental e de localização tiveram, respectivamente, pesos de 26%, 12% e 5%. Após a determinação dos pesos, foi feito o cálculo da consistência do modelo e a determinação dos pesos para os subcritérios, os quais estão apresentados na Tabela 02.

Tabela 02 – Pesos dos Subcritérios do Estudo de ARÁN CARRIÓN et al., (2008).

Peso Final	(%)
Uso do solo	5
Impacto visual	4
Declividade	9
Orientação	7
Acesso às rodovias	2
Distância as subestações de energia	2
Distâncias das áreas urbanas com população acima de 5.000 habitantes	1
Distâncias das áreas urbanas com população abaixo de 5.000 habitantes	1
Radiação global	19
Radiação difusa	11
Horas de brilho de Sol	25
Temperatura	14

Fonte: ARÁN CARRIÓN et al., (2008).

No SIG, os pesos dos subcritérios foram associados com seu respectivo *layer* temático (normalizado) para gerar mapas finais de aptidão. Nestes mapas, foram realizadas ainda análises de uso e ocupação do solo, onde foram extraídas do modelo àquelas regiões cuja atividade e ou ocupação necessitasse ser preservada (zonas de exclusão).

Como resultado final, foram identificadas várias regiões com potencial de instalação de usinas solares fotovoltaicas devido, sobretudo, ao fator climático favorável (alto número de horas de Sol no ano), às medias moderadas de temperatura anual e ao alto nível de radiação global na superfície horizontal na área de estudo. Em contrapartida, muitas outras regiões da área de estudo foram consideradas inapropriadas para a instalação de usinas solares devido ao fato de estarem localizadas em áreas consideradas de exclusão.

ARÁN CARRIÓN et. al., (2008) expôs a inserção de subjetividade (quando são atribuídos pesos aos diversos critérios do estudo) na avaliação do potencial técnico, ambiental e econômico do aproveitamento solar para a geração de eletricidade. Além disso, evidenciou o potencial de uso das tecnologias do Geoprocessamento, sobretudo dos SIG, na construção e avaliação dos cenários geográficos para a identificação das áreas suscetíveis à instalação de usinas solares.

O estudo de CHARABI e GASTLI (2011) apresentou a construção de um sistema de mapeamento para identificar os locais mais promissores à instalação de fazendas solares com tecnologia fotovoltaica em Oman (Oriente Médio). O estudo também considerou questões de ordem técnica, econômica e ambiental para a avaliação do projeto solar e a identificação das áreas potenciais.

Em regiões de clima quente e árido, a localização é ótima para fazendas solares. Em Oman, os principais parâmetros considerados estão mostrados na Tabela 03.

Tabela 03 – Classificação dos Parâmetros que afetam a Localização Ótima de Fazendas Solares segundo o Estudo de CHARABI e GASTLI (2011).

Parâmetros Técnicos	Parâmetros Econômicos	Parâmetros Ambientais
Radiação solar	Proximidade com a rede elétrica	Áreas de restrição
Possibilidades de acesso	Declividade do terreno	Recursos hídricos
Uso do solo	Centros de consumo	Riscos de tempestades de areia

Fonte: CHARABI e GASTLI (2011).

A radiação solar representa um parâmetro importantíssimo na localização da fazenda solar, uma vez que está relacionada com a produção de energia. A análise das possibilidades de acesso se justifica pela necessidade de evitar custos adicionais com a construção de novas rodovias. Por fim, a avaliação do uso do solo é importante para checar as condições para o desenvolvimento do projeto.

Com relação à avaliação das possibilidades de conexão com a rede elétrica e com os centros de consumo, o estudo indicou a questão de perdas com a transmissão da energia, a qual será maior quanto maior for a distância da fazenda solar à rede elétrica a tais centros. A declividade do terreno onde será instalada a fazenda solar não deverá ser acentuada, por isso, inclinações menores que 5% são consideradas essenciais. Com relação às áreas de restrição, é importante observar que regiões de preservação ambiental, monumentos históricos, florestas deverão ser evitadas, bem como as regiões que apresentam riscos de tempestades de areia. A avaliação de recursos hídricos foi justificada pela necessidade de limpeza dos componentes, que poderá ser uma questão crucial em regiões áridas como Oman.

Após a definição dos parâmetros importantes do estudo, CHARABI e GASTLI (2011) fizeram a identificação das áreas promissoras para a inserção da tecnologia a partir do uso da Lógica *Fuzzy* (para a normalização dos critérios), técnica AHP (para a definição dos pesos dos parâmetros) e da técnica da Média Ponderada Ordenada – *Ordered Weighted Averaging* (OWA). A técnica OWA pondera os parâmetros segundo sua importância relativa e mantém as restrições como máscaras *booleanas* que multiplicam o resultado da integração de tais parâmetros. Essa metodologia de agregação permite ao usuário controlar a relação risco e compensação durante análise, de forma a conhecer o nível de risco assumido na decisão e o grau em que a ponderação dos parâmetros terá influência sobre o mapa de aptidão.

As análises realizadas permitiram a conclusão de que 0,5% da área de estudo (cerca de 1.508,2km²) apresentou alta aptidão para a implantação de fazendas solares. Ademais, dentre as tecnologias que foram consideradas no estudo (tecnologia PV c-Si, a-Si, CdTe, CIGS e CPV) para a geração elétrica, foi observado que a tecnologia CPV proveu o mais alto potencial técnico para a implantação de projetos de grande porte.

Importante salientar que, muito embora a possibilidade de conexão com a rede elétrica e com os centros de consumo tenham sido mencionados na pesquisa como parâmetros importantes para a implantação das fazendas solares, os mesmos não foram usados nas análises devido à indisponibilidade desta informação espacial no momento da pesquisa. Além disso, boa parte do território analisado era ocupada pelas áreas de restrição, o que contribuiu também para a obtenção do percentual de 0,5% para as áreas com alta aptidão.

O estudo realizado por SÁNCHEZ-LOZANO et. al., (2013) também objetivou a identificação de áreas promissoras para a implantação de fazendas solares. A metodologia foi aplicada para Cartagena, situada na região Sudeste da Espanha, e também foi baseada no uso combinado do SIG e da Análise de Decisão Multicritério (ADM).

A primeira etapa do estudo foi a definição dos *layers* importantes e a exclusão das áreas que causam impedimento para a instalação da planta solar (parques, florestas, sítios arqueológicos, sítios paleontológicos e regiões onde passam os cursos d'água) uma vez que tais ambientes não podem ser utilizadas para a instalação de fazendas solares. A definição das áreas de exclusão foi feita com o auxílio do *layer* de municípios da região, que foi obtido na Direção Geral de Cadastro – *Dirección General del Catastro* (DGC). Desta primeira análise de uso e ocupação do solo, evidenciou-se que aproximadamente 25,5% da área de estudo, o que equivale a 270,78km², apresentou potencial para a instalação das fazendas solares.

Informações do cadastro e registro dos lotes de Cartagena, obtidos também no DGC, foram utilizadas para estabelecer duas outras áreas de restrição no estudo:

- Os lotes com qualquer tipo de construção foram indicados como inaptos para a instalação das fazendas solares;
- Os lotes com área menor que 1.000m² (área mínima requerida para o estabelecimento dos projetos) também foram indicados como inaptos.

Com isso, ficou definido que a área de aplicação das análises seriam aquelas que não tivessem qualquer tipo de construção, nem ocupassem áreas menores que 1.000m² e que estivessem inseridas nos limites das áreas consideradas aptas segundo o uso do solo. Assim, a área definida para aplicação das análises foi de 13,85% da área total.

Na etapa seguinte foi feita a definição dos critérios e subcritérios. Os quatros critérios definidos no estudo foram o climático, ambiental, geomorfológico e de localização. O critério climático é relacionado à produção de energia elétrica da usina solar, enquanto que, o critério ambiental define a aceitabilidade da área segundo sua capacidade agrícola. O critério geomorfológico define a aptidão da área no que diz respeito à inclinação do terreno. E, por fim, o critério localização considera a proximidade com as principais rodovias, com o sistema elétrico (linhas de transmissão e subestações de energia) e com os centros de consumo onde será usada a energia gerada fazenda solar.

A definição dos pesos para os critérios foi feita com o auxílio de um profissional da área de energia renováveis subsidiado pelo método AHP. No único cenário avaliado, o critério de localização foi considerado o mais importante. Tal escolha foi justificada pelo fato de que a utilização de equipamentos com alta eficiência, em locais com bons índices de radiação, permite estimar o critério climático com menor importância frente ao critério de localização em análises deste tipo. Deste modo, os pesos dos critérios foram estimados como sendo: localização (48,6%), climático (28,5%), orográfico (17,3%) e ambiental (5,6%). Uma vez obtidos os pesos para os critérios, foram calculados os pesos para os subcritérios, os quais estão apresentados na Tabela 04.

Tabela 04 – Pesos dos Subcritérios do Estudo de SÁNCHEZ-LOZANO et. al., (2013).

Crítérios	Subcritérios	Peso Final
Localização	Distância às linhas de transmissão	32,5%
	Distâncias às subestações	8,9%
	Distâncias às principais rodovias	4,2%
	Distâncias aos centros (<i>villages</i>)	2,8%
Climático	Radiação solar global	23,8%
	Temperatura ambiente	4,7%
Orográfico	Inclinação do terreno	11,2%
	Orientação do terreno	4,8%
	Modelo do lote	1,2%
Ambiental	Capacidade agrícola	5,5%

Da Tabela 04, é possível perceber que o critério ambiental apresentou menor peso frente aos demais critérios considerados no estudo. Isto porque o objetivo principal do critério ambiental é mostrar que o impacto no ambiente é mínimo do ponto de vista da coexistência de outras atividades com o uso da tecnologia fotovoltaica.

O último passo no desenvolvimento da metodologia aplicada foi a construção do modelo no SIG. Para isto, os dados espaciais relativos aos subcritérios foram padronizados e editados, com o auxílio do *software* gvSIG, para posterior agregação. A agregação dos dados foi feita neste *software* com o uso do método TOPSIS que é um método da ADM bastante utilizado para análises e avaliação das alternativas geradas. Seu principal objetivo é auxiliar a tomada de decisão com base no conceito de que a escolha da melhor alternativa deve ser feita em função da menor distância da solução ideal e positiva – *Positive Ideal Solution* (PIS) e da maior distância da solução negativa – *Negative Ideal Solution* (NIS). O resultado final é exibido sob a forma de classes de aptidão.

Para a área de aplicação das análises em Cartagena (13,85% de sua área total), foram encontradas quatro classes de aptidão: excelente aptidão (3,2%), muito boa aptidão (9,6%), boa aptidão (0,77%) e baixa aptidão (0,27%). O modelo foi então validado (validação *pixel a pixel*) e afirmado como satisfatório para a abordagem definida.

A pesquisa de SÁNCHEZ-LOZANO et. al., (2013) demonstrou também o quanto é importante realizar estudos de localização para ter informações relativas à área em que se deseja instalar o projeto. A partir do uso de informações gráficas (espaciais) e não gráficas (inerentes ao projeto solar), associadas ao uso combinado do SIG e ADM, é possível fazer a identificação das áreas com potencial de instalação, inclusive pela adoção de um *ranking* dos locais mais aptos. Deste modo, a tomada de decisão sobre o local onde deverá ser implantado o projeto solar fica mais facilitada.

Finalmente, o **estudo realizado por SÁNCHEZ-LOZANO et. al., (2014)** também utilizou uma metodologia baseada em SIG e ADM (desta vez, método ELECTRE-TRI) para a identificação das áreas mais promissoras à implantação de fazendas solares, com tecnologia fotovoltaica, no município de Torre Pacheco (área total de 189,60km²), situado no Sudoeste da Espanha.

Novamente, a primeira etapa do estudo foi a definição dos *layers* importantes e a exclusão das áreas que causam impedimento para a instalação da planta solar. Entre as áreas de restrição estavam inclusas, as áreas de parques, florestas, sítios arqueológicos, sítios paleontológicos, áreas urbanas, áreas de interesse comunidade, zonas militares, regiões onde passam os cursos d'água, como também as áreas dos lotes que tinha construções e os lotes que tinham menos de 1.000m² (especificação requerida pelo projeto). Assim, a área total definida para aplicação das análises foi de 35% da área total, o que corresponde a 65,36km².

Após a definição da área de aplicação das análises, o passo seguinte foi a definição dos critérios e dos subcritérios do estudo. Analogamente à pesquisa apresentada em 2013, neste novo estudo também foram considerados quatro critérios - climático, geomorfológico, ambiental e de localização, os quais foram usados para avaliar o potencial de cada localidade para a inserção da planta fotovoltaica. Os critérios e dos subcritérios definidos está mostrado na Tabela 05.

Tabela 05 – Critérios e Subcritérios do Estudo de SÁNCHEZ-LOZANO et. al., (2014).

Critérios	Subcritérios
Localização	Distância às linhas de transmissão
	Distâncias às subestações
	Distâncias às principais rodovias
	Distâncias aos centros urbanos
Climático	Radiação solar global
	Temperatura ambiente
Orográfico	Inclinação do terreno
	Orientação do terreno
	Modelo do lote
Ambiental	Capacidade agrícola

Uma vez definidos os critérios e subcritérios do estudo, o passo seguinte foi a padronização, edição e representação dos dados espaciais (relativos aos subcritérios) no SIG. Tal processo foi realizado com o auxílio do *software* gvSIG. Também nele foram calculadas as distâncias para os *layers* do critério de localização.

Para a construção das alternativas foi usado o método ELECTRE-TRI, disponível no *software* IRIS. De modo geral, os métodos baseados em ELECTRE (*Elimination and (et) Choice Translating Algorithm*) exigem por parte do tomador de decisão, um comportamento completamente racional, capaz de definir sua preferência entre quaisquer duas alternativas. Sua aplicação apresenta dois estágios: 1) a construção da relação de sobreclassificação; 2) a exploração dos resultados da etapa anterior.

O processo de construção consiste em comparar as alternativas, considerando todos os critérios. Assim, em um problema de n alternativas e m critérios, são necessários pelo menos $m \times n (n-1)/2$ comparações. Em geral, a relação de sobreclassificação S origina-se a partir da comparação entre cada alternativa de A e cada outra alternativa de A , utilizando as relações P , Q e I . Essas comparações podem ser feitas de modo distinto, mas, de modo geral, baseiam-se no princípio da concordância e da discordância, PARREIRAS (2006).

O princípio da concordância e da discordância torna a afirmativa – *A alternativa a é pelo menos tão boa quanto à alternativa b* – aceita, somente se duas condições forem satisfeitas:

- Para a maior parte dos critérios – critérios concordantes – essa afirmativa é válida;
- A oposição da minoria restante – critérios discordantes – não é suficientemente forte para invalidar essa afirmativa.

Segundo PARREIRAS (2006) a relação de sobreclassificação nem sempre é capaz de produzir a ordenação das alternativas de A, devido, por exemplo, ao fato do método ELECTRE admitir julgamentos em que a relação de sobreclassificação não é transitiva. Com isso, surge a necessidade de um segundo estágio, em que as relações construídas entre as alternativas são exploradas segundo diretrizes conforme o tipo de problema em questão. O resultado final pode ser a seleção de um conjunto de alternativas consideradas satisfatórias, a ordenação de todas as alternativas ou ainda a classificação de alternativas em categorias previamente definidas.

Para a construção e avaliação das alternativas no *software* IRIS, SÁNCHEZ-LOZANO et. al., (2014) foram auxiliados por um profissional da área de energias renováveis com mais de 10 anos de experiência no setor industrial. Esse profissional foi o responsável pelo julgamento de certa quantidade de alternativas. Também a este profissional, foi dada a responsabilidade de avaliar, juntamente com os autores, os resultados obtidos do IRIS. No total, foram 20 alternativas construídas.

Considerando as análises realizadas, os autores perceberam que das 20 alternativas geradas, apenas uma apresentou excelente capacidade para a instalação das fazendas solares fotovoltaicas. Quatro delas obtiveram uma capacidade classificada como muito boa. Dez apresentaram capacidade boa e o restante apresentou baixa capacidade.

SÁNCHEZ-LOZANO et. al., (2014) demonstraram, novamente, o potencial de aplicação do SIG e das técnicas de ADM na identificação das áreas promissoras para a instalação das fazendas solares (tecnologia solar fotovoltaica) na Espanha. A grande vantagem desta combinação está na possibilidade de desenvolver cenários diferenciados para auxiliar o gestor no processo de tomada de decisão.

2.1.6.2 Localização pelo Custo de Produção de Eletricidade

Um dos estudos pioneiros de localização de usinas solares por meio do uso do custo de produção de eletricidade foi o **estudo de BROESAMLE et. al., (2001)**, o qual expôs a utilização do recurso STEPS para a classificação e a seleção de áreas para a implantação de usinas solares termoeletricas de coletores parabólicos.

Em sua primeira aplicação o recurso STEPS teve a finalidade de avaliar o potencial técnico de geração na África do Norte e também definir o preço da eletricidade gerada na região. Em sua estrutura, era possível processar informações geográficas e meteorológicas, consideradas essenciais para a localização, como também realizar cálculos de produção de energia (simulação do bloco de potência) e de seus respectivos custos.

Na primeira etapa do estudo foi feita a avaliação do uso e ocupação do solo para a instalação. Para isso, BROESAMLE et. al., (2001) organizaram toda a base de dados espaciais (uso do solo, declividade do terreno, recursos hídricos, entre outros) para uso. Também foi feita a separação das áreas de exclusão da área total de estudo, gerando assim, um *layer* para representação das áreas de aplicação das análises. Desta primeira análise, foi verificado que cerca de 12,6 mil km² da área de estudo foi classificada como potencial para a instalação segundo as análises de uso e ocupação do solo.

O passo seguinte foi a avaliação do potencial técnico local. Para isto, foi utilizada uma formulação matemática, baseada em um modelo de céu limpo (BIRD, 1984 e IQBAL, 1993), para estimar a radiação solar direta normal incidente na região. Tal formulação somente foi alterada para adicionar o coeficiente de transmissão, o qual leva em consideração a atenuação da radiação pelas nuvens.

Imagens do satélite METEOSAT (canais visível e infravermelho) foram usadas para derivar o índice de nuvens. A transmitância devida aos aerossóis foi calculada pelo uso do conjunto de dados globais de aerossol de Kopke - *Global Aerosol Data Set by Kopke* e os valores para a absorção da água e ozônio foram obtidos, respectivamente, pela NASA *Water Vapour Project* (NVAP) e pela NASA *Total Ozone Mapping Spectrometer Project* (TOMS).

Devido ao fato dos valores obtidos para os aerossóis apresentarem baixa resolução, os mesmos foram substituídos por valores típicos para áreas desérticas ou semidesérticas. Como resultado deste processo, a radiação solar direta foi obtida com uma concordância de $\pm 5\%$ com relação à radiação medida em 1998, em Almería, Sul da Espanha, e foi dada como satisfatória para a avaliação do potencial solar. Mas, muito embora a radiação tenha sido calculada, o dado espacial usado nas demais análises foi o derivado do satélite METEOSAT.

Após a definição do potencial técnico da região, foi feita a simulação da produção de energia elétrica na usina solar. Para isto, BROESAMLE et. al., (2001) determinaram, primeiramente, a energia térmica instantânea do campo solar, a partir da consideração das propriedades físicas dos coletores LS-3, instalados nas SEGS. Tal determinação levou em consideração os principais efeitos geométricos destes coletores: perdas do cosseno ($\xi_{\cos}$), perdas finais na extremidade do coletor (ξ_E), perdas devidas ao modificador do ângulo de incidência (ξ_{IAM}) e perdas de sombreamento (ξ_S); as perdas ópticas decorrentes da reflexão, transmissão e absorção da radiação solar (η_{opt} =constante); E as perdas térmicas que estão relacionadas com a diferença de temperatura da superfície do tubo absorvedor ($T_A=653K$) e a temperatura ambiente percebida pelo tubo absorvedor quando está exposto a luz solar, como mostra a Equação 17:

$$\dot{Q}_{SF} = A_{SF} \cdot DNI \cdot \left[\xi_{geo} \cdot \eta_{opt} - \frac{\pi \cdot U}{C \cdot DNI} \cdot (T_A - T_{amb}) - \frac{\pi \cdot \varepsilon \cdot \sigma}{C \cdot DNI} \cdot (T_A^4 - T_{amb}^4) \right] \quad (\text{Eq. 17})$$

Onde:

A_{SF} = área do campo solar;

DNI = radiação solar direta normal;

ξ_{geo} = eficiência geométrica ($\xi_{geo} = \xi_{\cos} \cdot \xi_E \cdot \xi_{IAM} \cdot \xi_S$);

η_{opt} = eficiência óptica;

π = número pi;

U = fator de perdas por convecção de perdas (W/m^2K);

C = fator de concentração da calha parabólica;

ε = coeficiente de emissão da superfície do tubo absorvedor;

σ = constante de Boltzmann (W/m^2K^4).

A determinação da eletricidade gerada na usina foi feita a partir de uma equação matemática simples (que foi apresentada no tópico 2.1.4 - Equação 13) que considera a energia térmica gerada no campo solar, a eficiência nominal do ciclo de potência, o comportamento parcial das cargas e o consumo elétrico parasitário no campo solar e no bloco de potência da usina. O resultado foi integrado ao ano a fim de obter a produção de energia elétrica anual da usina solar.

A simulação da produção anual de energia elétrica da usina apresentou resultados aceitáveis, representando adequadamente os efeitos geométricos do ângulo de incidência para regiões com latitudes entre 0° e 40° (Norte e Sul). Uma comparação com medições realizadas nas usinas SEGS da Califórnia mostrou uma concordância aceitável com o modelo utilizado. Para a primeira aplicação do recurso STEPS, a acurácia obtida de $\pm 5\%$ foi considerada satisfatória para seu uso.

Após a avaliação do potencial técnico local, foi calculado o custo de geração de eletricidade na região. Para tal cálculo considerou-se a usina solar operando somente em modo solar, sem armazenadores térmicos. Segundo BROESAMLE et. al., (2001), nesta situação, o custo da eletricidade gerada depende, principalmente, do custo de investimento, custo da infraestrutura necessária para a interligação elétrica, rodoviária e hídrica da usina, dos gastos anuais com operação e manutenção, do tempo de vida útil, da taxa de capital e da produção de energia líquida anual, conforme mostrado na Equação 14.

Para a região de estudo, foi encontrado um grande potencial técnico e econômico para instalação das usinas solares termoeletricas. Muitos ambientes apresentaram uma produção anual de energia elétrica acima de 125GWh/km² (valores anuais), com custos de geração menores que 12centavos/kWh.

O estudo realizado por BROESAMLE et. al., (2001) apresentou uma metodologia muito interessante para a localização das usinas solares, uma vez que, classifica os ambientes de acordo com o custo de geração da energia. Do ponto de vista prático, esta informação é importantíssima para os desenvolvedores e ou investidores de projetos já que permite obter uma primeira indicação dos gastos relacionados com o mesmo (implantação, manutenção, infraestrutura, entre outros).

Além disso, a pesquisa também demonstrou o potencial de aplicação das tecnologias do Geoprocessamento, sobretudo dos SIG, para a visualização dos locais mais atrativos em termos de produção anual de eletricidade e para a identificação das áreas mais promissoras para a instalação dos projetos.

Muito embora o modelo de produção de energia tenha apresentado alguns parâmetros constantes (como a temperatura ambiente, por exemplo), sua apresentação foi importante para determinar os custos de produção na região de estudo. Uma questão crítica foi a utilização de dados espaciais com baixa resolução espacial para a análise proposta. Quando dados espaciais de baixa resolução ou insuficientes para a análise proposta são usados, podem-se gerar, muitas vezes, simplificações equivocadas da realidade. Por isso, para a correta representação da realidade, dados espaciais com alto grau de qualidade são requeridos.

2.1.7 Planejamento Energético da Inserção de Usinas Solares no Brasil

No Brasil, o planejamento energético da inserção da tecnologia CSP deverá contar com quatro agentes principais: a Avaliação do Potencial Técnico, a Redução dos Custos da Tecnologia, a Definição de Políticas Públicas Energéticas e os Leilões de Energia. Cada um deles é discutido de forma sucinta a seguir.

De acordo com ARVIZU et al., (2013) a **Avaliação do Potencial Técnico** da geração de eletricidade está relacionado ao conhecimento dos índices de radiação solar direta normal na localidade, dos fatores de exclusão para o uso da terra (florestas, parques naturais, áreas urbanas, terras cultiváveis, dentre outros.) e dos desenvolvimentos futuros para o aperfeiçoamento da tecnologia.

No Brasil, diversos estudos de avaliação do potencial técnico de geração solar foram realizados. Dentre eles, se destacam os estudos de BURGUI (2013), AZEVEDO e TIBA (2013), TIBA et al., (2012) e CAVALCANTI e PETTI (2008) que, a partir do conhecimento da radiação solar incidente na região de estudo e da utilização de dados econômicos e ambientais delimitaram as áreas potencialmente disponíveis para a geração solar. Das avaliações realizadas, verifica-se que as principais barreiras para a inserção desta tecnologia no mercado brasileiro não está nos aspectos de ordem técnica, mas na falta de incentivos e metas para seu desenvolvimento e dos custos associados.

Segundo a Agência IEA (2014) os **Custos da Tecnologia CSP** ainda são elevados, especialmente em países como o Brasil onde a produção em larga escala ainda não existe. Se a projeção do *Sunshot* DOE/EUA se concretizar (redução do LCOE para US\$60/MWh em 2020), teremos da ordem de US\$ 0.09/kWh para o Brasil.

A redução dos custos da tecnologia CSP deverá ser alcançada a partir de melhorias nos componentes solares (melhoramentos na eficiência óptica e térmica dos concentradores, nos equipamentos usados na geração elétrica, nos sistemas de armazenamento, entre outros), pela redução dos custos dos componentes (produção em grande quantidade – fator de escala), pela redução dos custos de operação e manutenção (para reduzir a quebra dos espelhos, por exemplo) e na realização de P&D.

Uma **Política Pública Energética** é uma estratégia governamental para promover, de forma sustentável, o crescimento ou a mudança do setor energético do país. De acordo com SOLANGI et al., (2001) tais políticas incluem legislações, tratados internacionais e incentivos para investimento visando à mitigação dos impactos do aquecimento global ao meio ambiente e à formulação de propostas para evitar crises de disponibilidade e ou suprimento de energia.

A maior parte dos países que utilizam a energia solar para aproveitamento elétrico, seja a partir da tecnologia fotovoltaica ou CSP, dispusera de algum tipo de política pública de incentivo à geração. Os países com caso de sucesso são os Estados Unidos, Espanha, Canadá, Alemanha, Austrália, China e França. Para o caso brasileiro, a definição de políticas públicas específicas para a geração solar auxiliará, sem dúvida, o desenvolvimento da tecnologia CSP em projetos de larga escala.

De acordo com a ANEEL, o **Leilão de Energia** é um processo licitatório para compra de energia elétrica, regido pelo edital e seus documentos correlatos. No modelo regulatório vigente, as concessionárias, permissionárias e as autorizadas de serviço público de distribuição de energia elétrica, interligadas ao SIN, devem garantir, por meio de licitação na modalidade dos leilões, o atendimento à totalidade do seu mercado no Ambiente de Contratação Regulada (ACR). Nesses leilões, os vencedores são os que ofertarem energia elétrica pelo menor preço por MWh, para atender a demanda prevista pelos distribuidores.

Os leilões de energia podem ser do tipo A-1, A-3 ou A-5. Nos leilões do tipo A-3 é possível contratar energia de novos projetos três anos antes do início das operações e no A-5, cinco anos antes. Também é possível contratar energia de projetos já existente um ano antes do suprimento (chamados leilões A-1).

Além desses leilões convencionais (A-1, A-3 e A-5), poderão ser promovidos Leilões de Ajuste para complementar a carga de energia necessária ao atendimento do mercado consumidor das concessionárias de distribuição, até o limite de 1%. Há ainda a contratação de energia de reserva, pelos Leilões de Reserva que tem como principal objetivo garantir a segurança de suprimento de eletricidade à rede através de planta de geração contratadas especialmente para tal propósito.

Os leilões de energia encontram-se bem estabelecidos nos dias atuais. Inclusive a eles é creditado o desenvolvimento da Energia Eólica no Brasil nos últimos anos. Espera-se, para os próximos anos, que esses leilões sejam também os responsáveis pela introdução de projetos comerciais de geração elétrica CSP na matriz brasileira.

2.2 Tecnologias do Geoprocessamento no Suporte aos Estudos de Localização de Usinas Solares Termoeletricas

O termo Geoprocessamento surgiu para agrupar numa única denominação as diversas tecnologias existentes que utilizam informação geográfica. Tais tecnologias realizam a coleta, o processamento, análise e a disponibilização da informação geográfica, a partir de soluções dadas em função de *hardwares*, *softwares* e também especialistas, para produzir documentos cartográficos e ou prover subsídios à tomada de decisão. Dentre essas tecnologias estão inclusos os SIG, Sistemas de Posicionamento Global – *Global Positioning System* (GPS), Sensoriamento Remoto, Geodésia, Fotogrametria, Topografia, e outras técnicas cartográficas e geográficas.

Usualmente, as tecnologias do Geoprocessamento têm sido amplamente utilizadas em diversas áreas do conhecimento, como a Agricultura de Precisão, Cartografia, Comunicações, Energia, Transportes e Meio Ambiente. Para atender ao objeto de estudo da pesquisa, as tecnologias utilizadas foram os SIG, a Álgebra de Mapas e o Processo de *Fuzzification*.

2.2.1 SIG - Sistemas de Informação Geográfica

As definições são diversas para a tecnologia SIG, como, por exemplo:

“SIG se caracteriza como um conjunto de tecnologias implementadas em ambiente computacional que é capaz de manipular, armazenar e recuperar dados objetivando simular, a partir de simplificações, situações e contextos existentes no mundo real”. (BURROUGH e MCDONNELL, 1998).

“SIG pode ser definido como uma aplicação computacional capaz de realizar qualquer operação na informação geográfica, da aquisição a compilação, por meio de funções de visualização, pesquisa, análise, modelagem e armazenamento”. (LONGLEY et. al., 2005).

“SIG são recursos computacionais voltados para a análise, consulta, desenvolvimento, manipulação e armazenamento da informação geográfica, sendo comumente usados em várias áreas do conhecimento como, por exemplo, na Cartografia, na Navegação, na Logística, no Planejamento Urbano, entre outros”. (SÁNCHEZ-LOZANO et. al., 2013).

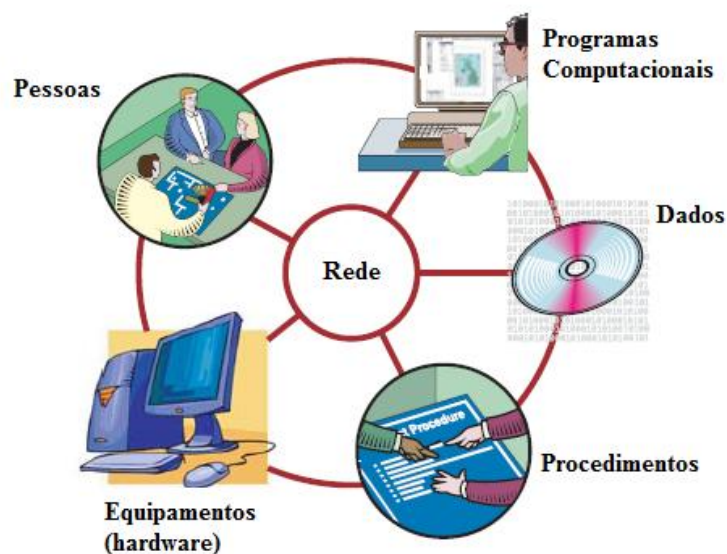
Nesta pesquisa a definição adotada foi a de RIBEIRO (2005):

“SIG são sistemas computacionais desenvolvidos com o propósito de processamento digital da informação geográfica, considerando seus aspectos geométricos, topológicos e temporais. São compostos por recursos de softwares desenvolvidos para potencializar a aquisição de dados geográficos, pesquisa e análise espacial de fenômenos e fatos geográficos, além de gerar mapas, cartas, plantas digitais ou relatórios diversos, alcançando a integração de informações geográficas em vários níveis temáticos. Numa visão social e tecnológica, os SIG estão, em geral, associados a projetos institucionais e requerem pessoal qualificado para sua operação, compondo equipes multidisciplinares de trabalho, com propósitos específicos e diversos”.

2.2.1.1 Componentes de um SIG

Segundo LONGLEY et. al., (2005), o SIG pode ser representado como uma rede que relaciona pessoas aos dados espaciais, por meio da utilização de *hardwares*, *softwares* e de procedimentos, como mostra a Figura 16.

Figura 16 – Componentes de um SIG.



Fonte Adaptada: LONGLEY et al., (2005).

Os **softwares** correspondem aos programas computacionais utilizados nos sistemas baseados em SIG, que contemplam, basicamente, cinco módulos:

- a) Coleta, padronização, entrada e validação de dados;
- b) Armazenamento e recuperação de dados;
- c) Transformação e processamento dos dados;
- d) Análise de geração da informação;
- e) Saída e apresentação dos resultados.

Quanto aos sistemas operacionais, verifica-se que os programas são mais utilizados na plataforma *Windows*, todavia estão disponíveis nas plataformas *Linux*, *MacOS X* e *Android*.

Os **hardwares** correspondem à plataforma computacional utilizada, as quais incluem computadores e periféricos como impressora, *plotter*, *scanner* e unidades de armazenamento.

Os **dados** compreendem as informações geográficas que formam a Base de Dados Espaciais (BDE) do sistema. De acordo com BURROUGH e MCDONNELL (1998), a natureza dessa informação possui quatro características indissociáveis: posição geográfica, atributos, relações topológicas e temporais. As coordenadas correspondem à posição geográfica, indicando sua localização de forma unívoca. Os atributos armazenam suas características descritivas. As relações topológicas expõem o relacionamento com a vizinhança e as relações temporais consideram que todos os fenômenos concretos que ocorrem na superfície da Terra estão relacionados com intervalo ou instante de tempo.

Quando a informação geográfica é introduzida no SIG, a posição e os atributos são associados para uso no sistema. A posição é apoiada pelos Sistemas Geodésicos de Referência, Sistemas de Coordenadas, Sistemas de Projeção Cartográfica e pela Escala, podendo ser representada nos modelos de dados, vetorial e matricial (ou *raster*). Por outro lado, os atributos são estruturados por listas sequenciais (registros) ou arquivos indexados.

As **pessoas** representam os profissionais responsáveis pelo projeto, como também, os usuários do sistema.

Os **procedimentos** compreendem as metodologias e as ações práticas existentes para que o sistema opere adequadamente à organização.

Para MEDEIROS (1997), estas componentes se relacionam de forma hierárquica: no nível mais próximo ao usuário, a interface homem-máquina define como o sistema é operado e controlado; No nível intermediário, um SIG deve ter mecanismos de processamento da informação espacial (entrada, edição, análise, visualização e saída) e no nível mais interno do sistema, um Sistema Gerenciador de Bancos de Dados (SGBD) oferece armazenamento e recuperação dos dados espaciais.

O uso do SIG é cada vez mais necessário na análise do espaço geográfico, principalmente nas áreas onde o volume de dados manipulados é muito grande. Na área de Fontes Renováveis de Energia, os SIG têm sido muito utilizados para prover subsídios para inserir e integrar energias renováveis, avaliar a geração distribuída e conectada à rede elétrica; e analisar o sistema de produção descentralizada e autônoma de eletricidade, (TIBA et al., 2008).

2.2.1.2 Representação da Informação Geográfica

A abordagem mais usual para a representação da informação geográfica no ambiente computacional é relativa à existência de quatro universos: o mundo real, o conceitual, a representação e a implementação, (WORBOYS, 1995).

No **universo do mundo real**, encontram-se os fenômenos a serem representados no sistema, os quais necessitam de uma escala de medidas para sua caracterização. Segundo LONGLEY et al., (2005), há cinco tipos de escala para os atributos da informação geográfica: nominal, ordinal, intervalo, razão e cíclico.

Os atributos nominal e ordinal são genuinamente temáticos. O nominal é usado para identificar ou caracterizar uma entidade de outra. Exemplos são as classes de solos como o latossolo e o neossolo. O atributo ordinal além de atribuir valores para as entidades, gera um conjunto ordenado delas. Exemplos são as classes de aptidão agrícola: 1-Alta, 2-Regular, 3-Regular a Restrita, 4-Restrita, 5-Restrita a Desfavorável, 6-Desaconselhável.

Os atributos intervalo e razão são numéricos. Nos atributos do tipo intervalo, o ponto de referência zero é definido de forma arbitrária, permitindo assim, a atribuição de valores negativos e positivos para a entidade. Um exemplo é a localização em latitude geodésica que têm a Linha do Equador como referência zero para a determinação de posições sobre a superfície terrestre. No atributo razão o ponto de referência zero não é arbitrado, mas determinado por alguma condição natural. Por exemplo, na descrição de atributos como a distância entre os dois pontos, a área e o volume de entidades.

Os atributos cíclicos, por sua vez, estão relacionados àquelas medidas que representam direções ou fenômenos cíclicos, isto é, onde dois pontos distintos na escala podem apresentar uma mesma informação. Um exemplo que pode ser dado é a longitude geodésica, que varia de 0° a 360° positivamente por Leste, e os meses do ano.

No **universo conceitual**, a informação geográfica é representada no SIG segundo as visões de objetos discretos e campos contínuos.

A visão de objetos discretos representa o espaço geográfico como objetos com limites bem definidos. Apresentam atributos descritivos, armazenados num banco de dados, e podem estar associados a representações gráficas (ponto, linha e polígono). Um exemplo que pode ser dado é o registro das ferrovias que cortam o estado de Pernambuco, que dispõe de localização exata, limites definidos e é distinguível dos demais objetos do seu entorno.

Na visão de campos contínuos, o espaço geográfico é representado como um número finito de variáveis, que possui valor em qualquer ponto da superfície terrestre. Uns exemplos são os mapas de classificação do tipo de solo e os mapas de aptidão agrícola, que apresentam uma distribuição espacial contínua em todos os pontos pertencentes a uma região geográfica.

Os conceitos de objetos discretos e campos contínuos determinam duas visões para a representação da informação geográfica, mas não abordam a questão da representação digital nos SIG. Esta, por sua vez, é feita a partir do universo de representação.

No **universo de representação**, duas estruturas são utilizadas para tratar o problema da representação digital: vetorial e matricial ou *raster*.

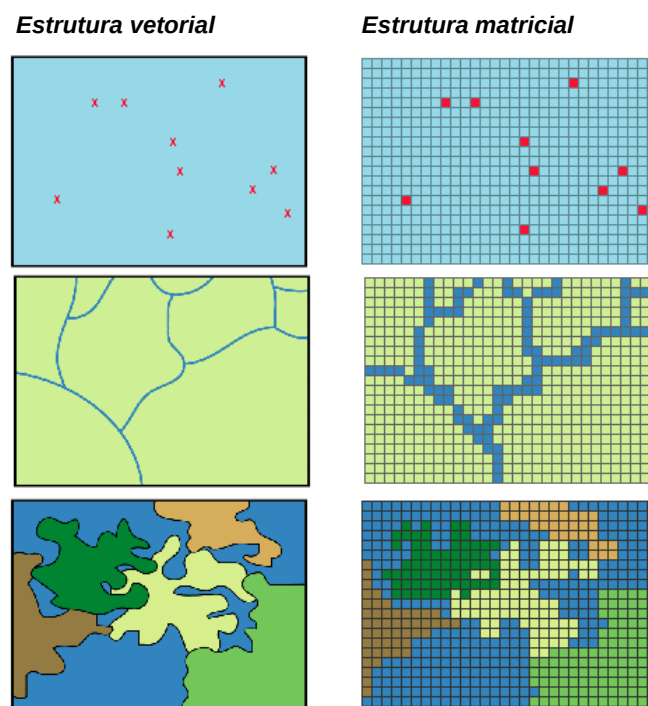
Na estrutura vetorial, há a ocorrência das primitivas geográficas – ponto, linha e polígono – para a representação digital da informação geográfica. O ponto é representado por um par ordenado (x, y) de coordenadas espaciais. A linha são conjuntos de pontos conectados, estando definida por, no mínimo, dois pares de pontos, um inicial e um ponto final. Os polígonos representam a região do plano limitada por uma ou mais linhas, formando uma primitiva matemática fechada, ou seja, o ponto inicial tem coordenadas iguais as do ponto final.

Na estrutura matricial o espaço geográfico é tratado como uma superfície plana, onde cada célula está associada a uma porção do terreno. A matriz é composta por um conjunto de células (*pixels*) dispostas em linhas (x) e colunas (y), de tal forma que cada célula possui um número de linha, um número de coluna e um valor correspondente ao atributo associado.

Na estrutura matricial há somente uma estrutura para a representação dos objetos do mundo real, a célula. Assim, um ponto é representado por uma única célula. A linha seria um conjunto de células de mesmo valor que se distribuem segundo uma determinada direção e, o polígono é representado por um conjunto de células circunvizinhas de mesmo valor.

Uma ilustração das estruturas vetorial e matricial está apresentada na Figura 17.

Figura 17 – Representação das Estruturas Vetorial e Matricial.



Fonte: COELHO (2006).

Finalmente, no **universo de implementação** estão as estruturas de indexação espacial que serão usadas para a construção do sistema. Para estas estruturas, os métodos de acesso aos dados espaciais, os quais englobam algoritmos de pesquisa e recuperação de informações, representam uma componente determinante no desempenho do sistema visto que a Base de Dados Espaciais definida para um determinado tema ou fenômeno é, de modo geral, ampla. Segundo LONGLEY et al., (2005), entre as principais estruturas de indexação espacial estão a árvore B (*Balanced Tree*), o *Grid Index* e a *Quadtree*.

2.2.1.3 Análises Espaciais

A análise espacial é a componente do SIG que inclui todas as manipulações e metodologias a serem aplicadas aos dados espaciais, transformando-os em informação útil para uso nos projetos. Seu principal objetivo é mensurar propriedades e relacionamentos do fenômeno espacial, levando em consideração sua localização espacial, (GOODCHILD e HAINING, 2004; LONGLEY et al., 2005).

Os processos da análise espacial atuam basicamente em três tipos de dados: a) eventos ou padrões pontuais, quando o fenômeno espacial é identificado como um ponto localizado no espaço, como a ocorrência de doenças e a localização de espécies vegetais; b) superfícies contínuas, quando o fenômeno é estimado a partir de amostras de campo, como os dados resultantes de medições topográficas e levantamentos fitogeográficos; c) áreas com contagens ou taxas, onde dados associados aos levantamentos populacionais são utilizados e estão relacionados a localizações específicas do espaço como os setores censitários e municípios.

Segundo LONGLEY et al., (2005), existem seis tipos de análises espaciais em SIG:

- a) Queries (Pesquisas): é o tipo mais usual de análise SIG, onde o especialista responde a uma questão do usuário. Tal questão poderá estar relacionada, por exemplo, a uma feição no mapa, no banco de dados ou a uma informação descritiva do dado na tabela de atributos (*SQL Query*);
- b) Mensurações: representam os tipos de medição que são efetuadas em ambiente SIG, como as distâncias entre dois pontos, cálculos de área, cálculo de declividade, aspecto, perímetro, entre outros;
- c) Transformações: onde objetos e bases de dados espaciais são transformados em recurso útil para a identificação de aspectos que não são evidenciados imediatamente. Pertencem a este grupo a determinação do *buffer*, recursos para a análise da ocorrência de sobreposição de polígonos, os métodos de interpolação espacial, como os polígonos de *Thiessen*, o método *kriging* e a estimação de densidade;

- d) Descrições Sumárias: são usadas na descrição e na avaliação do conjunto de dados. São chamadas também de estatísticas espaciais uma vez que inclui definições como a média, dispersão e frequência;
- e) Análises de Otimização: são técnicas designadas para selecionar localizações ideais para os objetos, mediante a utilização de critérios previamente definidos. Tais técnicas são amplamente usadas no setor de transportes, entre outros;
- f) Testes de Hipóteses: que relacionam os testes da Estatística e o conceito de inferência às definições do SIG.

Segundo FISCHER et al., (1996) a análise espacial dispõe de duas áreas de estudo principais: a) a modelagem espacial, que utiliza modelos determinísticos e estocásticos nas ciências ambientais e socioeconômicas; b) a análise estatística de dados espaciais que engloba a amostragem de objetos no banco de dados, escolha da escala de análise, compatibilidade de dados coletados, análise exploratória dos dados e análise inferencial.

As fases de análise exploratória dos dados e análise inferencial utilizam técnicas da estatística espacial para obter, respectivamente, uma boa descrição do dado a fim de ajudar o especialista a desenvolver hipóteses sobre o assunto, apresentando modelos apropriados, e a distribuição estatística subjacente aos dados coletados.

Um tipo mais recente de análise espacial que tem apresentado aumento no interesse é a análise espaço-temporal, que utiliza modelos preditivos com representação espaço-temporal para a representação dos fenômenos. Tal análise envolve ainda desafios nos âmbitos conceituais e de modelagem uma vez que cada tipo de dado tem particularidades próprias.

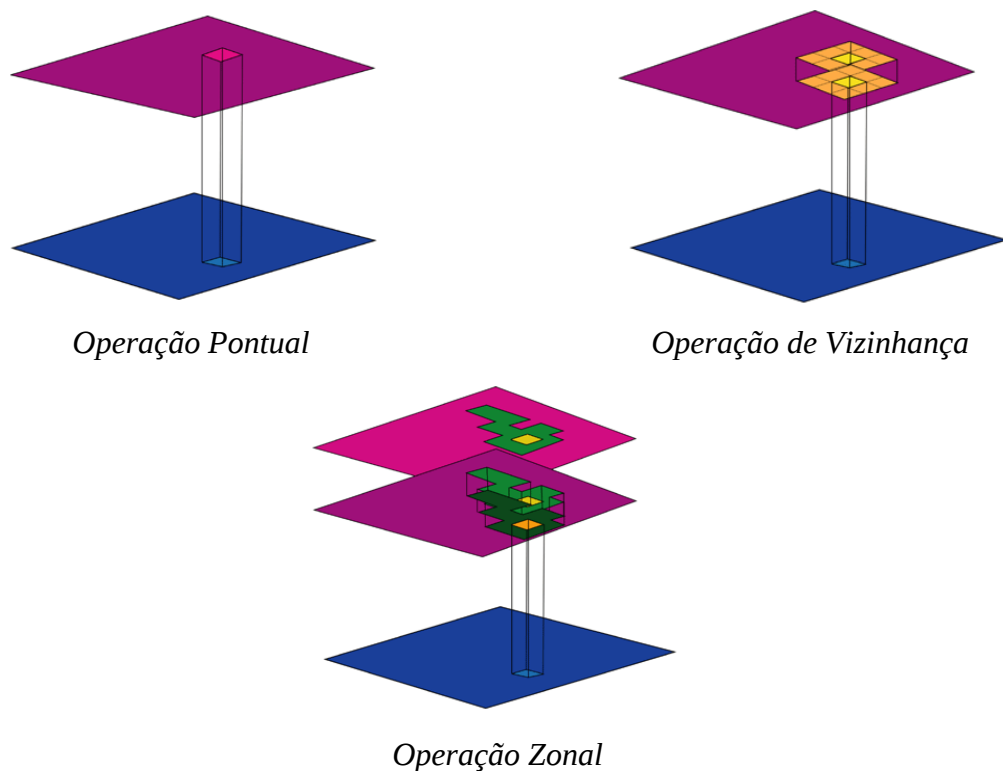
2.2.2 Álgebra de Mapas

A Álgebra de Mapas (ou Álgebra de Campos) foi introduzida por Dana Tomlin no final da década de 70 e pode ser vista como um conjunto de convenções, capacidades e técnicas analíticas para a realização de operações com geocampos no modelo matricial em ambiente de SIG. Seus procedimentos se apoiam na Álgebra Clássica para definir relacionamentos entre os geocampos e visam à geração de novas informações a partir de funções de manipulação que são aplicadas a estes.

Os operadores da Álgebra de Mapas tratam os geocampos como variáveis individuais, camadas, associando a cada posição geográfica de uma determinada área de estudo a um valor qualitativo ou quantitativo, a partir do uso de expressões com sintaxe bem definida. Segundo MENNIS et al., (2005) tais operadores podem ser agrupados em três classes: pontuais, zonais e de vizinhança.

Considerando o geocampo origem como a variável a ser utilizada nas operações e o geocampo destino o elemento resultante dessas operações, uma operação é dita pontual, se o valor resultante sobre cada ponto do geocampo destino é independente dos valores de pontos vizinhos no geocampo origem. Operadores zonais são usados nas situações onde o valor resultante sobre cada ponto do geocampo destino é dado em função de uma ou mais regiões geográficas estáticas e definidas no geocampo origem. Por fim, a operação é de vizinhança se o valor resultante sobre cada ponto do geocampo destino for dado em função dos valores de pontos vizinhos (definidos por uma máscara) no geocampo origem. Um esquema desta classificação é apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Classificação das Operações na Álgebra de Mapas.



Fonte Adaptada: ESRI (2015).

De acordo com LONGLEY et al., (2005) há ainda um quarto operador para a Álgebra de Mapas, o operador global que resulta em geocampos originados a partir de funções que englobam todas as células do geocampo origem.

A partir dos conceitos definidos, os operadores da Álgebra de Mapas são apresentados.

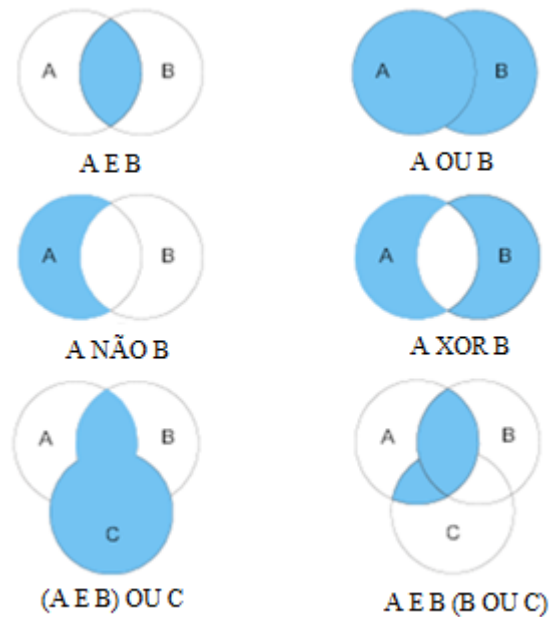
2.2.2.1 Operações Pontuais

Nas operações pontuais, o valor resultante sobre cada ponto do geo-campo destino independe dos valores dos pontos vizinhos. Neste grupo de operações estão as operações matemáticas e as relações de transformação como a ponderação, fatiamento e reclassificação.

Entre os Operadores Matemáticos mais usuais na Álgebra de Mapas estão a Soma, Subtração, Multiplicação, Divisão, Média, Máximo, Mínimo e as Combinações *Booleanas*. Os operadores **Soma**, **Subtração**, **Multiplicação** ou a **Divisão**, por exemplo, geram geocampo destinos cujo valor resultante é, respectivamente, soma, subtração, multiplicação ou divisão do valor do atributo no geocampo origem com uma constante. Estes operadores podem também representar operações cujo valor resultante é, respectivamente, soma, subtração, multiplicação ou divisão dos valores dos atributos de dois ou mais geocampos origem.

Um tipo de operação pontual importante em ambientes SIG é a **Combinação Booleana**. Nesta operação, o geocampo destino será gerado a partir da comparação, baseada em lógica *booleana*, dos valores dos atributos nos geocampos de origem. A álgebra *booleana* utiliza os ponderadores lógicos E, OU, Exclusivo OU (XOR) e NÃO para determinar se uma hipótese satisfaz ou não uma condição particular, conforme ilustra a Figura 19.

Figura 19 – Operadores da Lógica Booleana.



Fonte: BURROUGH e MCDONNELL et al., (1998).

Analizando a Figura 19, verifica-se que o operador E retorna a interseção entre dois ou mais conjuntos, ou seja, as entidades que pertencem tanto ao conjunto A quanto ao conjunto B. O operador OU retorna a união entre os conjuntos. O XOR recupera as entidades que pertencem a um conjunto e ao outro, mas não aos dois conjuntamente. E, finalmente, o operador NÃO que representa a diferença entre as entidades que pertencem a um conjunto A, mas não ao B.

Entre os operadores de Transformação mais comuns estão o **Fatiamento**, a **Ponderação** e a **Reclassificação**. Na operação de **Fatiamento**, um geocampo temático é obtido a partir de um geocampo numérico. Um exemplo é a declividade que possui atributos numéricos, mas pode ser representada sob a forma de classes: regiões com declividades menores que 5% são consideradas baixas; entre 5-20% são regulares e acima de 25% são consideradas altas.

No processo de **Ponderação**, geocampos com atributos temáticos são transformados em geocampos numéricos. Um exemplo é a transformação de um conjunto de classes de solo (latossolo, argissolo, neossolo) em um conjunto de classes de solo ponderado (0.9, 0.8, 0.4), onde se ponderou latossolo com peso igual a 0.9, argissolo com peso igual a 0.8 e neossolo com peso igual a 0.4.

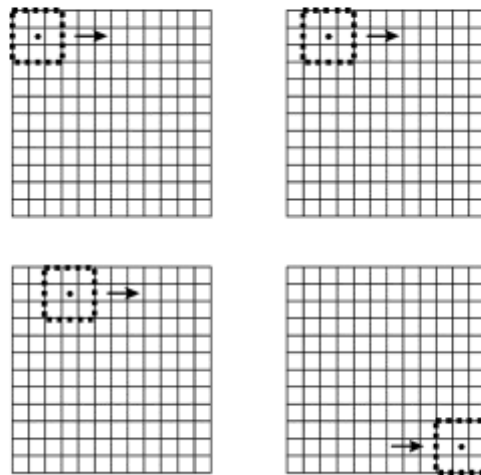
Por fim, no processo de **Reclassificação**, geo-campos temáticos são obtidos a partir das regras determinadas pelo usuário. Um exemplo deste tipo de operação são os mapas de aptidão agrícola, onde as classes de aptidão alta, baixa e média foram obtidas a partir das informações de tipo de solo latossolo, argissolo, neossolo.

2.2.2.2 Operações de Vizinhaça

As operações de vizinhaça atuam sobre um geo-campo origem sob a interferência de uma máscara. Durante o processamento, a máscara se desloca sobre o geocampo origem e aplica uma operação de vizinhaça sobre seus pontos (Figura 20). O valor resultante sobre os pontos no geocampo destino (na mesma posição geográfica do geo-campo origem) será dado em função dos valores dos pontos vizinhos na região delimitada pela máscara.

Figura 20 – Representação da Utilização da Máscara nas Operações de Vizinhaça.

Deslocamento da Máscara



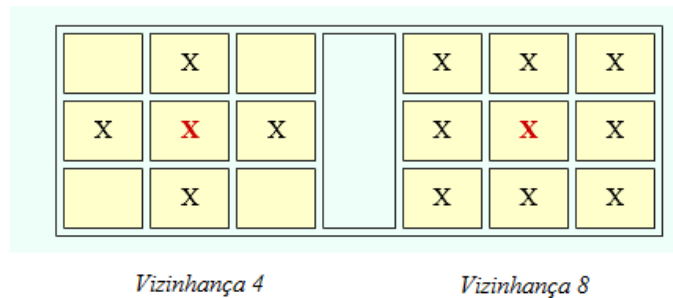
Representação do deslocamento de uma máscara, do tipo 3x3, para aplicação de um operador de vizinhaça. A máscara percorre os *pixels* da imagem e aplica uma operação que leva em conta os níveis digitais dos *pixels* vizinhos como também o próprio valor digital do *pixel* considerado.

No ambiente computacional, o formato mais usual de máscara é o de uma matriz de célula. Filtragens espaciais para Processamento Digital de Imagens (PDI) e as medidas de declividade são exemplos de operações de vizinhaça que utilizam máscara no formato de matriz de células, (BARBOSA, 1999).

Nas **Filtragens para PDI**, geocampos do tipo numéricos são utilizados para realçar determinadas feições lineares, direcionais, de borda ou padrões de textura nas imagens do Sensoriamento Remoto. A máscara utilizada é também uma imagem, em geral quadrada, de tamanho menor que a imagem original. Os valores da imagem máscara são usados como pesos a serem aplicados sobre os níveis digitais dos *pixels* da imagem original.

Na determinação da **Declividade** sobre uma região geográfica, um geocampo destino do tipo numérico é gerado a partir de um geocampo origem (também numérico) que contém valores de altimetria. Os algoritmos mais usuais para estimar a declividade (baseados em um modelo de grade regular retangular) utilizam matriz de células do tipo 3x3 com vizinhança 8 como máscara (Figura 21). Neste tipo de vizinhança, consideram-se, além do próprio *pixel*, os *pixels* mais próximos nas regiões horizontal, vertical (vizinhança 4) e diagonal desse *pixel* para a estimação dos valores resultantes.

Figura 21 – Representação das Vizinhanças 4 e 8 de uma Imagem Digital.



Representação das vizinhanças 4 e 8 de uma imagem digital: como vizinhança 4 de um *pixel*, considera-se, além do próprio *pixel*, os *pixels* mais próximos nas posições horizontal e vertical a esse *pixel*; Como vizinhança 8 de um *pixel*, considera-se, além do próprio *pixel*, a vizinhança 4 e também os *pixels* mais próximos nas direções diagonais em relação a esse *pixel*.

2.2.2.3 Operações Zonais

Operadores zonais são usados em situações onde o valor resultante sobre cada ponto do geocampo destino é dado em função de uma ou mais regiões geográficas no geocampo origem. Diferente das operações de vizinhança, onde a região geográfica é representada por uma máscara que se desloca sobre os dados, nas operações zonais as regiões são estáticas e não se deslocam sobre a região de estudo.

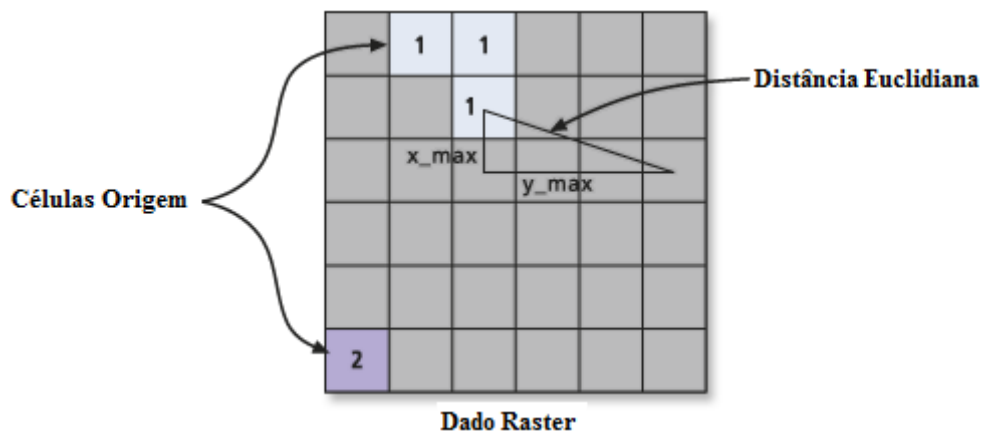
Os principais operadores zonais são os Cálculos Estatísticos (mínimo, máximo, média, moda, desvio padrão) que envolvem valores associados aos locais de regiões específicas dadas por alguma forma de restrição.

Na operação de **Máximo Zonal**, por exemplo, o valor do geocampo destino, em todas as posições, é igual ao maior valor do atributo encontrado na região sobre o geocampo origem. Assim, numa operação de máximo zonal onde o geocampo origem é a declividade e as zonas são definidas por um geo-campo de uso do solo, por exemplo, o geocampo destino retornará a máxima declividade encontrada em cada classe de uso do solo.

2.2.2.4 Operações Globais

Nas operações globais, valores do geocampo destino são gerados a partir de funções aplicadas a todas as células do geo-campo origem. Um exemplo desse tipo de operação é a obtenção das distâncias euclidianas, que retorna a menor distância para o objeto de interesse em um arquivo matricial (Figura 22).

Figura 22 – Determinação da Distância Euclidiana para um Dado Matricial.



A determinação das distâncias euclidianas é feita a partir da seguinte regra: “para cada célula do dado raster, a distância para a célula origem deve ser dada pelo cálculo da hipotenusa formada pelo triângulo de catetos x_{max} e y_{max} ”. Fonte Adaptada: ESRI (2015).

Como mostrado na Figura 22, a distância euclidiana define a menor distância para o objeto de interesse a partir da hipotenusa formada pelo centroide da célula origem (onde está o objeto de interesse) e o centroide das demais células. O cálculo é feito de modo sequencial e possibilita a varredura de todas as células do arquivo matricial. Como dado resultante no geocampo destino, valores de distância entre as células combinadas no processo são obtidas.

De modo geral, as operações da Álgebra de Mapas são utilizadas no desenvolvimento de modelos cartográficos em diversas áreas do conhecimento devido a sua sintaxe simples e possibilidade de representação de modelos complexos. Segundo LONGLEY et al., (2005), seus procedimentos são bastante conhecidos e referenciados como um dos mais influentes meios analíticos para a manipulação de dados *raster* em SIG.

Em uma abordagem mais recente da Álgebra de Mapas apresentada por MENNIS et al., (2005), fenômenos espaciais com início e fim estabelecido num intervalo de tempo (dados espaço temporais) são analisados a partir de técnicas de orientação a objetos. As matrizes espaço temporais são armazenadas em um ambiente de representação 3D onde funções cubo guardam as informações espaciais (duas dimensões) e as temporais. Os operadores pontuais, zonais e de vizinhança apoiam a análise dos dados espaço temporais a partir da extensão de seus algoritmos para as funções cúbicas. Entre as principais aplicações desta nova abordagem estão as modelagens dinâmicas de fenômenos meteorológicos e atmosféricos.

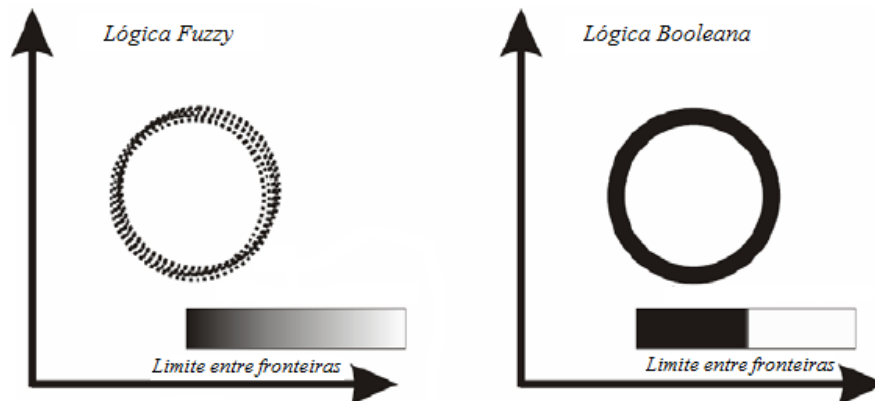
2.2.3 Lógica Fuzzy

Nos estudos de localização baseados em SIG e em ADM, uma etapa importante é a normalização dos dados espaciais. A normalização tem por objetivo representar os valores dos dados espaciais (originalmente não comparáveis entre si) em uma escala contínua para permitir que haja a agregação entre eles no ambiente do SIG. Uma das técnicas mais utilizadas para a normalização é a normalização por lógica *fuzzy*.

A lógica *fuzzy* é fundamentada na teoria dos conjuntos *fuzzy*, que representa classes de elementos que não tem fronteiras bem definidas. Esta teoria consiste de uma generalização da teoria de conjuntos clássica para resolver os paradoxos gerados pela classificação verdadeira ou falsa da lógica tradicional (*booleana*).

De acordo com JUNGES (2006), em um conjunto *fuzzy* é difícil distinguir elementos que pertencem a um conjunto daqueles elementos que não pertencem ao mesmo conjunto. Na lógica tradicional, dois extremos são possíveis: completamente verdadeiro (elemento que pertence ao conjunto) ou completamente falso (não pertence ao conjunto). Entretanto, na lógica *fuzzy*, há uma premissa que varia em grau de verdade de 0 a 1, tornando a questão parcialmente verdadeira ou parcialmente falsa. Esse grau de verdade pode ser visualizado no diagrama mostrado da Figura 23 que ilustra a diferença existente entre a lógica *booleana* e a lógica *fuzzy* no que diz respeito à fronteira de pertinência em um dado conjunto.

Figura 23 – Fronteiras Interpostas pelas Lógicas *Fuzzy* e *Booleana*.



O limite entre fronteiras é bem definido na lógica *booleana*. Por outro lado, na lógica *fuzzy* o limite é nebuloso, não fica claramente definido. Fonte: RUHOFF (2004).

Os primeiros trabalhos desenvolvidos com lógica *fuzzy* datam da década de 20, quando Jan Lukasiewicz introduziu conjuntos com grau de pertinência 0, $\frac{1}{2}$ e 1. Mais tarde, em 1965, Asker Zadeh combinou conceitos da lógica clássica e os conceitos de Lukasiewicz e expandiu o grau de pertinência para um número infinito de valores entre 0 e 1. Maiores detalhes deste trabalho podem ser vistos em ZADEH (1965).

2.2.3.1 Conjuntos *Fuzzy* e Funções de Pertinência

Seja U um dado conjunto Universo. Um subconjunto *fuzzy* F de U é caracterizado por uma função de pertinência, representada por $\mu_F: U \rightarrow [0,1]$, que associa a cada $x \in U$, um número real $\mu_F(x)$ definido no intervalo $[0,1]$. Esta representação permite uma transição gradual entre a pertinência ($\mu_F(x) = 1$) e a não pertinência ($\mu_F(x) = 0$).

A utilização de conjuntos *fuzzy* é baseada em regras de inferência e é indicada para as situações que lidam com ambiguidade, abstração e ambivalência em modelos matemáticos ou conceituais de fenômenos empíricos, (BURROUGH e MCDONNELL, 1998).

As funções de pertinência *fuzzy* representam as propriedades semânticas dos conjuntos *fuzzy* e podem apresentar formatos distintos. Entre as mais conhecidas estão a função linear, a triangular, a trapezoidal, a gaussiana e a sigmoidal.

A função **linear** é considerada a função de pertinência *fuzzy* mais simples. Nela, os valores máximos e mínimos de um dado conjunto *fuzzy* serão representados no intervalo $[0, 1]$ sem maiores complicações. A função linear pode ser crescente ou decrescente.

A função **triangular** obedece a Equação 18 e tem como parâmetros os termos a , m e b , onde $a \leq m \leq b$, dado um conjunto *fuzzy* F no Universo U .

$$\mu_F(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a} & \text{se } a < x \leq m \\ \frac{b-x}{b-m} & \text{se } m < x \leq b \\ 0 & \text{se } x > b \end{cases} \quad (\text{Eq. 18})$$

O gráfico de uma função *fuzzy* triangular tem a forma de um triângulo, cuja base tem o intervalo $[a, b]$ e como único vértice fora da base, o ponto $(m, 1)$.

A função de pertinência **trapezoidal** tem a forma de um trapézio com base menor definida no intervalo $[m, n]$ e base maior dada no intervalo $[a, b]$, onde $a \leq m$, $n \leq b$ e $m < n$. A função trapezoidal obedece a seguinte Equação:

$$\mu_F(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a} & \text{se } a < x \leq m \\ 1 & \text{se } m < x \leq n \\ \frac{b-x}{b-n} & \text{se } n < x \leq b \\ 0 & \text{se } x > b \end{cases} \quad (\text{Eq. 19})$$

A função de pertinência é dita **gaussiana** (ou em forma de sino) se sua representação obedece a Equação 20, onde σ é o desvio padrão.

$$\mu_F(x) = e^{-\frac{(x-m)^2}{\sigma}} \quad (\text{Eq. 20})$$

Finalmente, a função de pertinência *fuzzy* é dita **sigmoidal** se obedece a Equação 21, onde β representa sua inclinação.

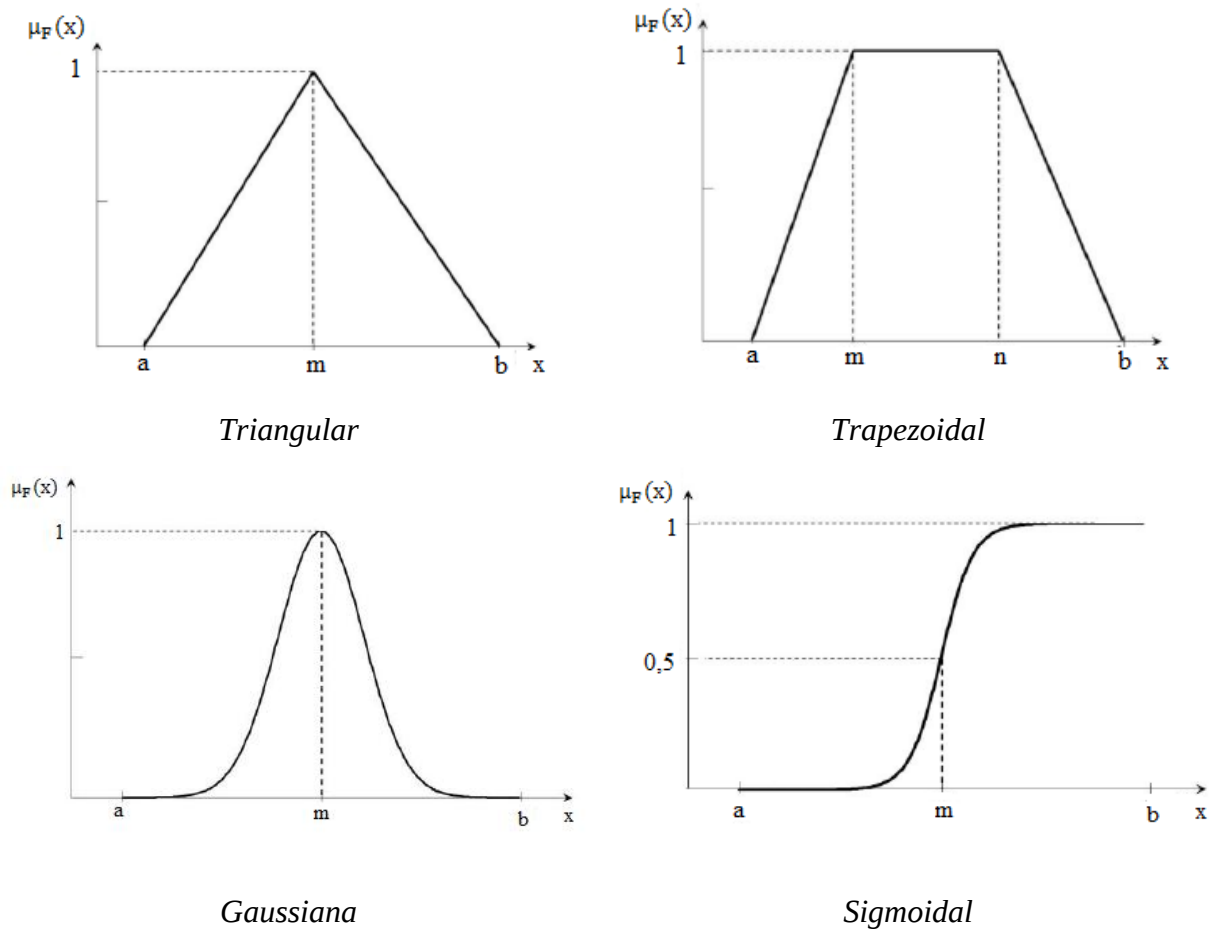
$$\mu_F(x) = \frac{1}{1 + e^{\frac{-(x-m)}{\beta}}} \quad (\text{Eq. 21})$$

Segundo FERNANDES (2005) a escolha da função de pertinência mais adequada para uma determinada aplicação nem sempre é óbvia, todavia existem sistemas *fuzzy* que possuem parâmetros completamente definidos. As funções de pertinência triangulares e trapezoidais, por exemplo, são muito adequadas para aplicações em que a ideia de pertinência pode ser total, média e nula que são mais objetivas que as especificações ligadas às funções gaussianas.

Para EASTMAN (1996) a função sigmoidal fornece uma lógica simples para os casos em que a função é assíntota. Além disso, a função sigmoidal sugere a utilização de pontos de controle para representar apropriadamente a ideia da pertinência.

Uma ilustração gráfica dos formatos das funções de pertinência triangular, trapezoidal, gaussiana e sigmoidal está apresentada na Figura 24.

Figura 24 – Funções de Pertinência Triangular, Trapezoidal, Gaussiana e Sigmoidal.



Fonte: VIEIRA (2013).

2.2.3.2 Operações entre Conjuntos *Fuzzy*

Conjuntos *fuzzy* podem ser manipulados por operações elementares para gerar nova informação. Um exemplo é a obtenção de um dado resultante da sobreposição de dados *fuzzy*.

Para CAMARA et al., (1996) as operações básicas dos conjuntos *fuzzy* representam uma generalização das operações da lógica clássica e podem ser: *Fuzzy AND* (Interseção), *Fuzzy OR* (União), Produto Algébrico *Fuzzy*, Soma Algébrica *Fuzzy* e Operador Gama.

A **Interseção** entre dois conjuntos *fuzzy* A e B é um conjunto *fuzzy* dado por $A \cap B$ cuja equação de pertinência é dada por:

$$\mu_{A \cap B} = \text{Min} [\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad \forall x \in U \quad (\text{Eq. 22})$$

Onde:

$\mu_A(x)$ e $\mu_B(x)$ são os valores de pertinência dos conjuntos A e B.

A **União** entre dois conjuntos *fuzzy* A e B é um conjunto *fuzzy* dado por $A \cup B$. Nesta operação, o valor de pertinência de saída é controlado pelos valores máximos dos dados de entrada. Sua equação de pertinência é dada por:

$$\mu_{A \cup B} = \text{Max} [\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad \forall x \in U \quad (\text{Eq. 23})$$

Onde:

$\mu_A(x)$ e $\mu_B(x)$ são os valores de pertinência dos conjuntos A e B.

A função de pertinência combinada para a operação **Produto Algébrico *Fuzzy*** é dada pela Equação 24.

$$\mu = \prod \mu_i \quad (\text{Eq. 24})$$

Onde:

μ_i é o valor de pertinência *fuzzy* para o i-ésimo dado;

i representa os dados que serão combinados ($i = 1, 2, 3 \dots n$).

Com o uso do operador Produto Algébrico *Fuzzy*, os valores de pertinência tendem a ser muito pequenos devido ao efeito de se multiplicar diversos números menores que 1, (CAMARA et al., 1996).

A **Soma Algébrica *Fuzzy*** é operador complemento do Produto Algébrico e é dada pela seguinte equação:

$$\mu = 1 - \prod (1 - \mu_i) \quad (\text{Eq. 25})$$

Onde:

μ_i é o valor de pertinência *fuzzy* para o i -ésimo dado;

i representa os dados que serão combinados ($i = 1, 2, 3 \dots n$).

O resultado desta operação é sempre um valor maior ou igual ao maior valor de pertinência *fuzzy* de entrada, logo, o efeito desta operação é aumentar o valor de pertinência, (CAMARA et al., 1996).

O **Operador Gama** é definido por dois termos: um Produto Algébrico *Fuzzy* e uma Soma Algébrica *Fuzzy*, conforme mostra a Equação 26:

$$\mu = (\text{soma algébrica fuzzy})^\gamma \times (\text{produto algébrico fuzzy})^{1-\gamma} \quad (\text{Eq. 26})$$

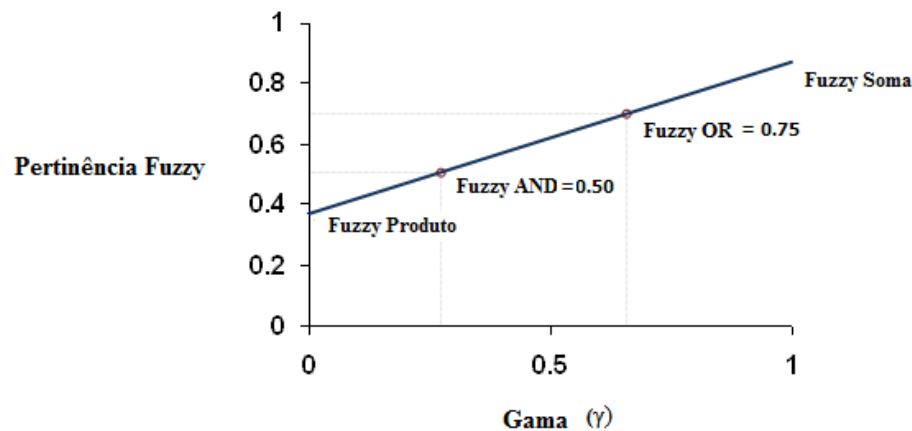
Onde:

A soma algebriza *fuzzy* é dada pela Equação 25;

O produto algébrico *fuzzy* é dado pela Equação 24.

A importância de cada termo no Operador Gama varia entre a Soma Algébrica *Fuzzy* e o Produto Algébrico *Fuzzy*. Tal importância está relacionada à atribuição de valores, no intervalo de 0 a 1, para o expoente γ , conforme ilustra a Figura 25.

Figura 25 – Ilustração Gráfica da Distribuição da Operação *Fuzzy Gama*.



Representação da Operação *Fuzzy Gama*, a partir da contextualização dos operadores Produto Algébrico *Fuzzy* e Soma Algébrica *Fuzzy*. Fonte Adaptada: BONHAM-CARTER (1994) apud CAMARA (1996).

Observando a Figura 25, se verifica que quando o γ for igual a zero, o resultado da operação Gama dependerá apenas do termo produto algébrico *fuzzy*. Por outro lado, quando γ for igual a 1, o resultado dependerá somente do termo soma algébrica *fuzzy*. No intervalo definido por $0 < \gamma < 0,35$, os valores de γ apresentam um caráter diminutivo, ou seja, sempre menor ou igual que o menor membro *fuzzy* de entrada (μ_i). Na outra extremidade, no intervalo $0,65 < \gamma < 1$, os valores de γ terão caráter aumentativo e o valor de saída deverá ser igual ou maior que o valor do maior membro *fuzzy* (μ_i). Por fim, para os valores definidos no intervalo $0,35 < \gamma < 0,65$, não há caráter diminutivo nem aumentativo e, os valores dos μ_i de saída cairão sempre entre o menor e o maior valor dos μ_i de entrada.

2.2.3.3 Raciocínio da Lógica *Fuzzy*

De acordo com SILVA (2013), a formulação do raciocínio *fuzzy* é formada por três etapas: a *fuzzificação*, a inferência e a *defuzzificação*.

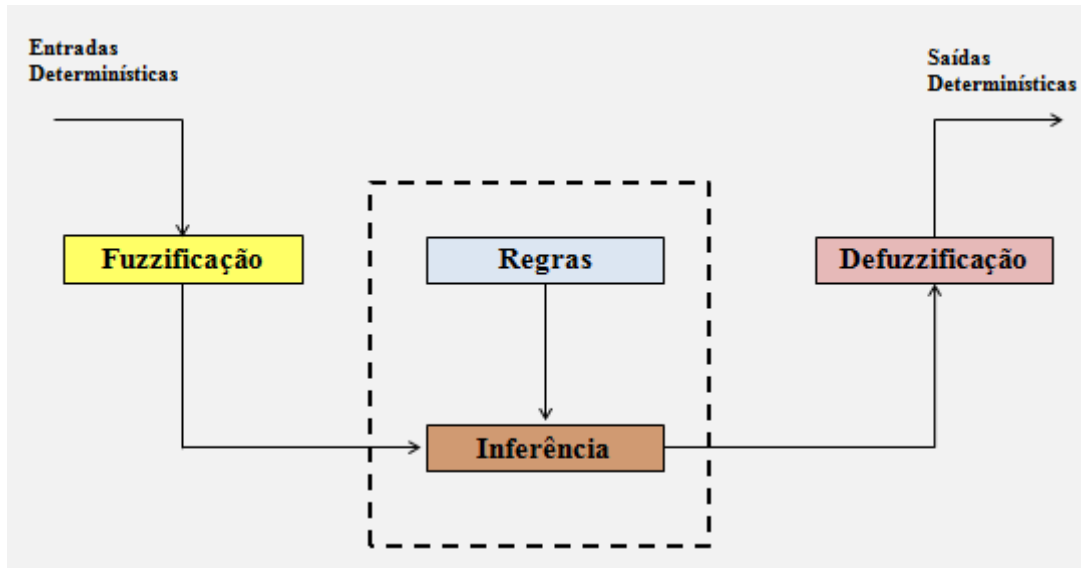
A **fuzzificação** é a primeira etapa de construção do raciocínio *fuzzy*. Por meio dela, as variáveis de um determinado problema são transformadas em valores *fuzzy*.

A **inferência** é a segunda e mais importante fase do raciocínio *fuzzy*, pois, a partir dela é feita a tomada de decisão acerca dos operadores *fuzzy* a serem usados, a avaliação da implicação das regras estabelecidas e a combinação das saídas *fuzzy*. Também é realizado o raciocínio em si, permitindo obter conclusões de fatos conhecidos (valores mínimo e máximo do conjunto *fuzzy*) e das variáveis linguísticas de entrada e de saída.

Por fim, na etapa de **defuzzificação**, o resultado *fuzzy* é transformado em resultado escalar, ou seja, a defuzzificação transforma o dado fuzzy em dado quantitativo dentro da faixa estipulada pela lógica *fuzzy*.

Uma ilustração das fases de construção do raciocínio *fuzzy* está mostrada na Figura 26.

Figura 26 – Etapas de Construção do Raciocínio Fuzzy.



Diversas pesquisas, sobretudo aquelas baseadas em ADM, têm utilizado a lógica *fuzzy* para a representação dos indicadores positivos existentes no sistema (aqueles que aprimoram a aptidão de uma alternativa em relação a uma atividade). Isto porque os modelos representados em *fuzzy* se aproximam muito dos processos de decisão que tem conhecimentos incertos ou inexatos. Além disso, os sistemas baseados em *fuzzy* possibilitam a captura do conhecimento próximo ao modelo cognitivo, o que torna o processo de aquisição de conhecimento mais fácil, mais confiável e menos sujeito a erros não identificados, (RUHHOF et al., 2004).

2.3 Análise de Decisão Multicritério

A Análise de Decisão Multicritério (ADM) pode ser entendida como um conjunto de procedimentos sistemáticos para analisar problemas complexos de decisão onde predominam situações de dúvidas, incertezas e ou conflitos de informação. Sua utilização iniciou-se entre as décadas de 70 e 80, visando substituir os modelos ortodoxos de Pesquisa Operacional até então existentes. Nos dias atuais, a ADM tem sido muito utilizada para prover subsídios à tomada de decisão em diversas áreas do conhecimento. Na área de Energia, por exemplo, o principal uso está relacionado às pesquisas de Planejamento Energético e a Classificação de Cenários para o Desenvolvimento de Fontes Renováveis.

De fato, a utilização de métodos baseados em ADM ocorreu quando os modelos da Pesquisa Operacional (que tratava de estudos para a logística das operações militares) se mostraram ineficazes para a abordagem de problemas em situação de múltiplos critérios e incertezas, já que se baseavam em representações matemáticas taxativas e axiomas rígidos que conduziam a uma decisão racional. Além disto, grandes contribuições do campo da Psicologia, Sociologia e da Ciência Cognitiva demonstravam que o enfoque da Pesquisa Operacional, às vezes, agredia o comportamento humano e o bom senso do gestor quando o conduziam a tomar ininterruptamente decisões racionais. Em virtude disso, foram desenvolvidos os métodos e os algoritmos da ADM, que permitem consentir tanto a existência de múltiplos critérios em seus modelos quanto à inserção da subjetividade nos mesmos.

De acordo com ROY (1985) apud TREVIZANO (2007), os métodos baseados em ADM podem ser subdivididos em três grupos:

- a) Métodos de Subordinação e Síntese: são métodos de origem francesa que buscam construir uma relação de subordinação que represente as preferências estabelecidas pelo gestor ao mesmo tempo em que o auxilia na resolução do problema. Alguns destes métodos são: PROMETHEE e os métodos da família ELECTREE;
- b) Métodos Interativos: que alternam as etapas de cálculo e etapas de interações com o gestor, o qual fornece informações suplementares e complementares sobre suas preferências. Exemplos deste método são: STEM e modelo PREFCALC;

- c) Teoria da Utilidade Multiatributo: que buscam agregar diferentes critérios numa única função que deverá ser otimizada. Muitos são os métodos pertencentes a este grupo. Entre eles destacam-se: MAUT, *Goal Programming*, *Compromise Programming* e método AHP.

Nesta Pesquisa, somente será abordado o método AHP, visto que, é método que mais se destaca na Teoria da Utilidade Multiatributo por sua fácil implementação e apresentação de algoritmo simples. Em virtude disso, esse método foi o utilizado na abordagem do problema de localização de usinas solares termoeletricas no estado de Pernambuco.

2.3.1 Processo Analítico Hierárquico (Método AHP)

Um dos principais métodos da Análise de Decisão Multicritério é o Processo Analítico Hierárquico – *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Este método foi desenvolvido por Thomas L. Saaty, em meados da década de 80, com o intuito de obter uma teoria geral de medição para ser usada tanto na mensuração de eventos com domínio físico quanto psicológico.

De modo geral, o método AHP estrutura o problema (objetivo do método) em níveis hierárquicos para facilitar sua compreensão. A partir dessa estruturação hierárquica, é feita a construção do modelo propriamente dito, ou seja, é realizada a comparação pareada entre os níveis hierárquicos definidos e também são efetuados os cálculos necessários à obtenção das prioridades. Como etapas finais do processo, são feitas a avaliação da consistência do modelo e a apresentação dos resultados.

2.3.1.1 Definição do Objetivo

Segundo ARÁN CARRIÓN et al., (2008), o objetivo do método (ou problema a ser resolvido) é uma função a ser desenvolvida e que estrutura toda a construção do modelo. O objetivo define a regra de decisão a ser utilizada.

2.3.1.2 Especificação das Hierarquias

Para compreender um problema complexo, o raciocínio humano busca, muitas vezes, dividir ou hierarquizar o problema em subproblemas a fim de encontrar meios de resolução do problema principal. De modo análogo, o método AHP divide o problema central em níveis hierárquicos para facilitar o entendimento e a busca de sua solução.

De acordo com SAATY (1980) o problema central no método AHP pode ser dividido em critérios, depois em subcritérios e em tantos níveis quanto forem necessários para melhor solução do problema. Os **critérios** possibilitam a caracterização dos principais elementos de um processo de tomada de decisão e para KEENEY e RAIFFA (1976 apud TREVIZANO (2007), o conjunto de critérios deverá ser:

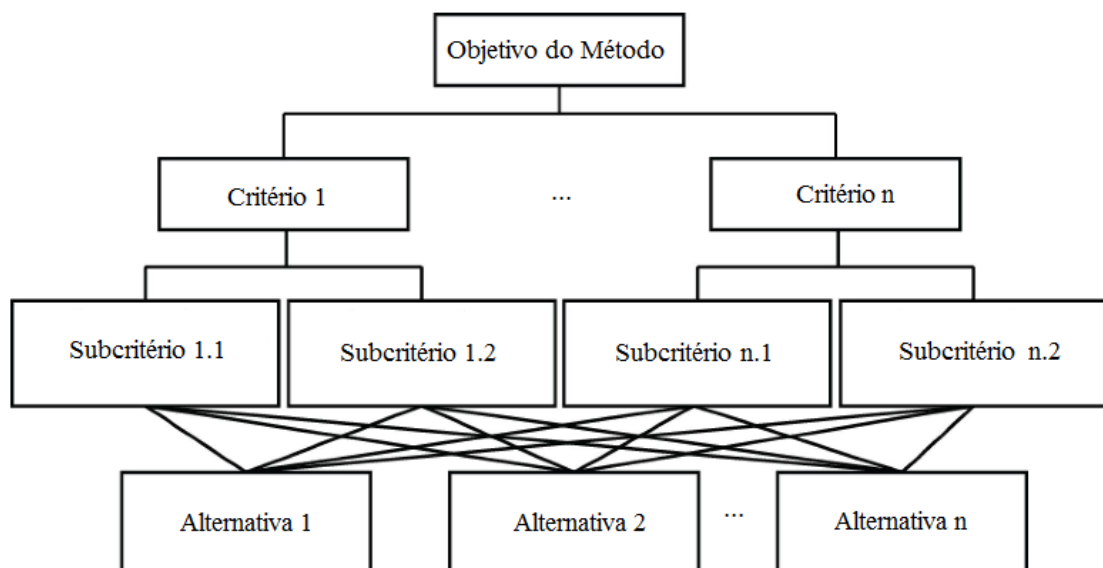
- a) Completo: o conjunto de critérios deve representar todos os aspectos importantes do problema em questão;
- b) Mínimo: o conjunto de critérios deve ser o menor possível, pois um número excessivo de critérios aumenta a complexidade do processo. Importante ressaltar que, deve ser mínimo, sem deixar de ser completo;
- c) Não Redundante: não deverá ter elementos que se repitam no conjunto de critérios;
- d) Operacional: os critérios do conjunto devem ter significado para o gestor, para que ele compreenda a implicação de cada um deles no resultado da avaliação;
- e) Decomponível: deve ser possível decompor os critérios em subcritérios e outros níveis para a simplificação do processo.

Os critérios podem ser decompostos em **subcritérios (ou fatores)** para melhor análise do problema. Estes, por sua vez, podem ser determinados por **indicadores** que têm a função de definir as magnitudes dos subcritérios. Os indicadores são classificados como **positivos**, quando não restringem a aptidão de uma alternativa; e como **negativos (ou restrições)**, quando restringem as alternativas devido à atividade a ser desenvolvida, (ARÁN CARRIÓN et al., 2008).

Considere, por exemplo, o estudo de localização de usinas solares. Um critério que pode ser definido para este estudo é o critério Ambiental, o qual poderá apresentar como subcritério a Aptidão Agrícola dos Solos. Este subcritério poderá ter como Indicador Negativo as Áreas de Alta ou Muito Alta Aptidão Agrícola, já que nestas áreas poderá haver disputas pelo uso da terra e, como Indicador Positivo, as Áreas de Baixa ou Muito Baixa Aptidão Agrícola pelo motivo oposto.

Um diagrama ilustrativo de construção de hierarquia no método AHP está mostrado na Figura 27. Nele, o problema principal foi dividido em dois níveis: critérios e subcritérios.

Figura 27 – Estrutura Hierárquica de um Processo de Decisão no Método AHP.



Fonte Adaptada: SAATY (1980)

Conforme ilustra a Figura 27, o objetivo do método está no topo da estrutura. Tal objetivo foi descomposto em critérios e em subcritérios para avaliação no método AHP. A partir da agregação dos subcritérios, as possíveis alternativas de resolução do problema são geradas. Estas, por sua vez, também precisam ser avaliadas quanto à concordância com os subcritérios definidos a fim de garantir a correta aplicação do modelo.

Importante ressaltar que o problema central no método AHP pode ser dividido em tantos níveis quanto forem necessários para a busca da melhor solução do problema.

2.3.1.3 Construção do Modelo

Após a definição do objetivo e a construção das hierarquias, é feita a construção do modelo para auxiliar a tomada de decisão. O primeiro passo desta construção é a **comparação pareada dos critérios**.

Segundo SAATY (1991), quando o ser humano compara um par de objetos similares, baseado em um conjunto específico de critérios, ele percebe as relações existentes entre esses objetos, julga suas características e opta por um elemento desse par identificando o grau de preferência de sua escolha. Fundamentado nesta afirmação, a busca da resolução do problema no método AHP passa necessariamente pela comparação pareada dos critérios estabelecidos no estudo.

Para fazer a comparação pareada dos critérios, SAATY (1980) propôs a utilização de uma escala de medidas visando à padronização dos julgamentos. Esta escala é apresentada na Tabela 06.

Tabela 06 – Escala Fundamental de Saaty.

Intensidade da Importância	Definição
1	Preferência ou Importância Igual
3	Preferência ou Importância Fraca
5	Preferência ou Importância Moderada
7	Preferência ou Importância Forte
9	Preferência ou Importância Absoluta

Fonte: SAATY (1980)

Os limites inferior e superior da Escala Fundamental de Saaty são representados por 1 e 9, respectivamente, visto que experimentos psicológicos demonstraram que o ser humano não é capaz de comparar simultaneamente mais de 7 ± 2 objetos. Também nesta escala, os valores numéricos pares de 2 a 8 são deixados para valores intermediários entre os elementos da escala principal, (SAATY, 1991).

A partir do uso da Escala de Saaty, os critérios são comparados entre si, originando uma **matriz de comparação de critérios**, ou seja, os elementos a_{ij} desta matriz representam o julgamento dado a cada par de critérios avaliado com base na Escala de Saaty. Se m é o número de elementos dessa matriz, o número de elementos a serem comparados é $m(m-1)/2$, já que esta matriz é recíproca e os elementos de sua diagonal principal são iguais a 1.

Para auxiliar no entendimento da geração dessa matriz de comparação, considere um problema que está vinculado a n critérios genéricos, $C_1, C_2, \dots, C_n$. A matriz de comparação pareada desses critérios (matriz A) será definida conforme apresentado na Figura 28:

Figura 28 – Matriz de Comparação de Critérios.

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & \dots & C_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Os elementos a_{ij} dessa matriz são definidos pelas seguintes condições:

- $a_{ij} > 0$, todos os elementos são positivos;
- A matriz A é recíproca, então $a_{ij} = 1/a_{ji}$;
- Os elementos de sua diagonal principais são iguais a 1, então $a_{ii}=1$;

O conceito de consistência está relacionado à noção de transitividade que incorpora as informações embutidas nos julgamentos. Muitas vezes, durante a aplicação do método AHP, matrizes inconsistentes são geradas devido a julgamentos intransitivos. Saaty propôs um método para a avaliação da consistência dos valores julgados. Este método será mostrado no item 2.2.2.1d.

Uma vez determinada a matriz de comparação pareada dos critérios, o passo seguinte é a normalização de seus elementos para a **estimativa dos pesos** (w_j). Um dos métodos mais utilizados para fazer esta estimativa é o da Média das Colunas Normalizadas.

Para estimar os pesos pela Média das Colunas Normalizadas, primeiramente são efetuados os somatórios dos elementos de cada coluna da matriz A ($S_1, S_2, \dots, S_n$). Em seguida, é gerada uma nova matriz onde cada elemento é resultado da divisão de cada elemento a_{ij} da matriz A pela soma da coluna correspondente, como mostrado na Figura 29.

Figura 29 – Matriz Auxiliar para Obtenção dos Pesos.

	C_1	C_2	...	C_n
C_1	a_{11}/S_1	a_{12}/S_2	...	a_{1n}/S_n
C_2	a_{21}/S_1	a_{22}/S_2	...	a_{2n}/S_n
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	...	$\vdots$
C_n	a_{n1}/S_1	a_{n2}/S_2	...	a_{nn}/S_n

Como última etapa deste procedimento é calculada a média dos valores normalizados das linhas que corresponde aos pesos estimados (Figura 30).

Figura 30 – Pesos Estimados.

	C_1	C_2	...	C_n
C_1	$w_{j1} = (a_{11}/S_1 + a_{12}/S_2 + \dots + a_{1n}/S_n) / n$			
C_2	$w_{j2} = (a_{21}/S_1 + a_{22}/S_2 + \dots + a_{2n}/S_n) / n$			
$\vdots$	$\vdots$			
C_n	$w_{jn} = (a_{n1}/S_1 + a_{n2}/S_2 + \dots + a_{nn}/S_n) / n$			

Deve-se observar que o somatório dos pesos obtidos para cada critério do estudo deve ser sempre igual a 1, SAATY (1991).

Após a definição dos pesos para os critérios (prioridade global) deve-se fazer a avaliação da consistência do modelo para analisar a transitividade dos valores julgados.

2.3.1.4 Avaliação da Consistência do Modelo

A avaliação da consistência no método AHP tem por objetivo analisar se os valores julgados para os critérios foram transitivos ou não. Esta análise é feita a partir da Razão de Consistência (RC) que é dada pela Equação 27:

$$RC = \frac{IC}{CR} \quad (\text{Eq. 27})$$

Onde:

IC = índice de consistência dos julgamentos;

CR = índice de consistência randômico.

O **índice de consistência** de uma matriz de comparação de critérios (IC) é calculado a partir da relação entre a ordem dessa matriz (n) e o seu maior autovalor ($\lambda_{\max}$). SAATY (1991) propôs a Equação 28 para a determinação do IC:

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (\text{Eq. 28})$$

Para a determinação do maior autovalor ($\lambda_{\max}$), é gerada uma nova matriz auxiliar (matriz A') onde seus elementos são obtidos a partir da multiplicação dos elementos a_{ij} da matriz de comparação de critérios pelo peso associado ao critério correspondente, conforme apresentado na Figura 31:

Figura 31 – Matriz Auxiliar A'

	C_1	C_2	...	C_n
C_1	$a_{11} \cdot w_{j1}$	$a_{12} \cdot w_{j2}$	...	$a_{1n} \cdot w_{jn}$
C_2	$a_{21} \cdot w_{j1}$	$a_{22} \cdot w_{j2}$	...	$a_{2n} \cdot w_{jn}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	...	$\vdots$
C_n	$a_{n1} \cdot w_{j1}$	$a_{n2} \cdot w_{j2}$	...	$a_{nn} \cdot w_{jn}$

O passo seguinte é a construção de dois vetores prioridade auxiliares: P' e P''. O valor de P' é obtido a partir da soma dos elementos de cada linha da matriz A' (Figura 32). Já o valor de P'' é obtido pela divisão dos valores de P' pelo vetor prioridade w_j associado a essa linha (Figura 33).

Figura 32 – Vetor Prioridade P'

$$P' = [S_1 \quad S_2 \quad \dots \quad S_n]$$

Figura 33 – Vetor Prioridade P''

$$P'' = \left[\frac{S_1}{w_{j1}} \quad \frac{S_2}{w_{j2}} \quad \dots \quad \frac{S_n}{w_{jn}} \right]$$

Por fim, $\lambda_{\max}$ será dado por (Figura 34)

Figura 34 – Maior autovalor da Matriz de Comparação de Critérios.

$$\lambda_{\max} = \frac{\left[\frac{S_1}{w_{j1}} + \frac{S_2}{w_{j2}} + \dots + \frac{S_n}{w_{jn}} \right]}{n}$$

O **índice de consistência randômico**, parâmetro da Equação 27, foi determinado empiricamente considerando uma amostra de 500 matrizes recíprocas positivas, geradas de modo aleatório, (ARÁN CARRIÓN et al., 2008). Os valores atribuídos a CR por Saaty, de acordo com a ordem da matriz (n), estão mostrados na Tabela 07.

Tabela 07 – Valores Empíricos do Índice de Consistência Randômico.

N	CR
2	0,00
3	0,58
4	0,90
5	1,12
6	1,24
7	1,32
8	1,41
9	1,45
10	1,49

Fonte: SAATY (2001)

Se o valor encontrado para a Razão de Consistência (RC) for maior ou igual a 0,1, os valores dos julgamentos na matriz de comparação de critérios devem ser revistos, pois não são suficientemente consistentes para estimar os pesos (w_j). Em contrapartida, se tal valor for menor que 0,1, os valores julgados são considerados satisfatórios, (SAATY, 1980).

Uma vez que os valores julgados dos critérios sejam definidos como consistentes (prioridade global), todo o processo de obtenção das prioridades deve ser repetido para os subcritérios a fim de estabelecer sua ordem de importância para a resolução do problema proposto. Também para estes, a análise de consistência dos valores julgados deverá ser realizada, (ARÁN CARRIÓN et al., 2008).

2.3.1.5 Apresentação dos Resultados

Como etapa final da aplicação do método AHP, os critérios e os subcritérios definidos no estudo são ordenados segundo seu grau de importância, podendo assim auxiliar a tomada de decisão por parte do gestor.

A utilização do método AHP no problema da localização das usinas solares sugere a construção de cenários para a avaliação das hierarquias do problema (critérios e subcritérios). Isto permite que, um mesmo grupo de hierarquias possa ser ponderado de modo distinto, segundo a definição primária de uma Regra de Decisão. De acordo com ARÁN CARRIÓN et al., (2008), o estabelecimento da regra de decisão num dado estudo define toda a estruturação do método AHP.

Considere, por exemplo, a existência de três critérios para a análise do problema da localização: critério climático, ambiental e de localização. Na construção do primeiro cenário do estudo, a regra de decisão poderá definir o critério climático como o mais importante, em seguida o critério de localização e por último o critério ambiental. Desta forma, a comparação entre os pares de critérios, usando a Escala Fundamental de Saaty (Tabela 06), deverá ser fundamentada nessa ordem de importância para determinar os pesos dos critérios; Ainda neste exemplo, um segundo cenário poderia ser definido considerando o critério ambiental como o mais importante frente ao critério climático (segundo em ordem de importância) e ao critério de localização, criando assim uma nova estruturação para o método AHP.

O estabelecimento dos níveis de aptidão de um território para a implantação das usinas solares em um estudo baseado no método AHP passa, necessariamente, pela análise firme dos cenários gerados e pela utilização dos SIG. Os cenários são os responsáveis pela avaliação das hierarquias do problema e definição dos pesos das variáveis consideradas importantes para a localização da usina solar. Em contrapartida, os SIG são os responsáveis pela representação geográfica dessas variáveis (a qual deve ser mais próxima possível da realidade), sua agregação e construção dos cenários geográficos para tornar mais ágil a tomada de decisão. Assim, o uso combinado da ADM e do SIG na localização das usinas solares subsidia a proposta de execução de projetos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Recursos Utilizados

3.1.1 Equipamentos, Processos e Programas Computacionais

- Algoritmo SOLPOS (*Sun Positions Algorithm*);
- Linguagem de Programação: *Python*;
- Programas Computacionais: ArcGIS 10.1 (ESRI); Spring 5.2.6 (INPE).

3.1.2 Base de Dados Espaciais

3.1.2.1 Arquivos Vetoriais

- Divisão Territorial do Brasil:
 - Conteúdo: Representação das Unidades Federativas, Regiões, Mesorregiões, Microrregiões e Municípios brasileiros;
 - Instituição: IBGE e INPE (Banco de dados do Spring);
 - Ano: 2014.
- Radiação Solar Direta Normal:
 - Conteúdo: Radiação Solar Direta Normal no Brasil - Valores diários médios anuais, sazonais e mensais;
 - Instituição: INPE e LABSOLAR/UFSC (Disponibilizado pelo SWERA);
 - Ano: 2009.
- Temperatura:
 - Conteúdo: Temperatura do Ar, em graus Celsius, obtida a 10m da Superfície da Terra – Valores anuais e mensais;
 - Instituição: NASA e SSE (*Surface Meteorology and Solar Energy*);
 - Ano: 2007.

- Unidades de Conservação Federais:
 - Conteúdo: Unidades de Conservação do Sistema Nacional – Uso Sustentável e Proteção Integral;
 - Instituição: ICMBio;
 - Ano: 2014.

- Unidades de Conservação Estaduais:
 - Conteúdo: Unidades de Conservação – Uso Sustentável e Proteção Integral, do Sistema Estadual de Unidades de Conservação da Natureza (SEUC);
 - Instituição: CPRH;
 - Ano: 2014.

- Mata Atlântica:
 - Conteúdo: Remanescentes Florestais de Mata Atlântica no Brasil;
 - Instituição: Fundação SOS Mata Atlântica (SOSMA) e INPE;
 - Ano: 2012.

- Territórios Indígenas:
 - Conteúdo: Relação dos Grupos Indígenas Brasileiros;
 - Instituição: FUNAI (Disponibilizado pela INDE);
 - Ano: 2012.

- Territórios Quilombolas:
 - Conteúdo: Relação dos Grupos Quilombolas Brasileiros;
 - Instituição: INCRA (Disponibilizado pela INDE);
 - Ano: 2013.

- Aptidão Agrícola:
 - Conteúdo: Classificação dos Solos do Brasil segundo o Potencial Agrícola;
 - Instituição: Ministério do Meio Ambiente (MMA);
 - Ano: 2009.

- Rodovias:
 - Conteúdo: Relação das Rodovias Estaduais e Federais do Nordeste;
 - Instituição: DNIT e DER-PE (Disponibilizado pela INDE);
 - Ano: 2014.

- Linhas de Distribuição:
 - Conteúdo: Linhas de Distribuição, Seccionadoras e Subestações do Sistema Elétrico (existente e planejado) do Estado de Pernambuco;
 - Instituição: CELPE;
 - Ano: 2011.

- Recursos Hídricos:
 - Conteúdo: Recursos Hídricos do Brasil;
 - Instituição: ANA (Disponibilizado pela INDE);
 - Ano: 2014.

3.1.2.2 Arquivos Matriciais

- Dados da Missão SRTM3²:
 - Conteúdo: Dados do SAR (Sensor de Abertura Sintética), com informações sobre o relevo do território brasileiro;
 - Instituição: EMPRABA Monitoramento por Satélite;
 - Ano: 2000³.

- Dados do LANDSAT 8:
 - Conteúdo: Imagens do satélite LANDSAT8 com informações sobre o uso das terras e as características ambientais;
 - Instituição: USGS (*U. S. Geological Survey*);
 - Ano: 2013.

² Os dados da missão SRTM3 são aqueles obtidos por meio de um Modelo Digital de Elevação (MDE) interferométrico de grade de 3 arcos segundo por 3 arcos segundo (90m x 90m).

³ O ano 2000 representa o período de obtenção dos dados originais da missão SRTM.

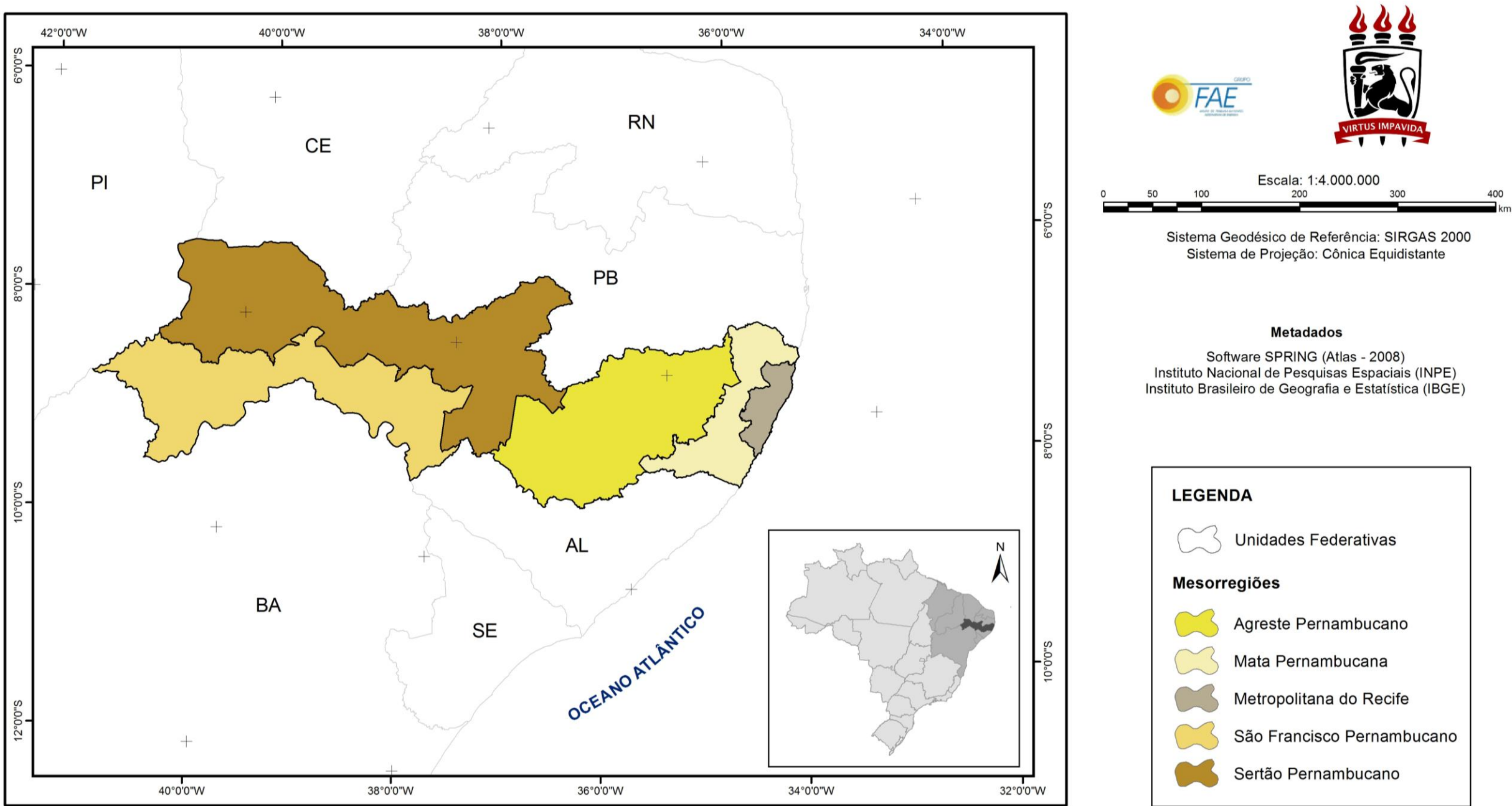
3.2 Área de Estudo: O Estado de Pernambuco

3.2.1 Caracterização Geográfica: O Estado por Mesorregiões

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o estado de Pernambuco situa-se no centro Leste da Região Nordeste do Brasil, entre as coordenadas 7°15' e 9°27' de latitude Sul e 34°00' e 48°19' de longitude Oeste. Com uma área territorial de 98.149,119km², Pernambuco faz limite com o oceano Atlântico e com os estados da Paraíba, Ceará, Piauí, Bahia e Alagoas. Também faz parte de seu território o arquipélago de Fernando de Noronha, localizado a 545km do Recife (capital pernambucana).

Considerando a divisão regional do Brasil em Mesorregiões Geográficas, Pernambuco possui cinco ambientes bem definidos, tal como ilustra a Figura 35 – Mapa das Mesorregiões do Estado de Pernambuco: *Metropolitana do Recife*, *Mata Pernambucana*, *Agreste Pernambucano*, *Sertão Pernambucano* e *São Francisco Pernambucano*. Cada uma dessas mesorregiões é formada por grupos de municípios. No total, Pernambuco tem 184 municípios e uma região distrital (Fernando de Noronha).

Figura 35 – Mapa das Mesorregiões do Estado de Pernambuco



Como mostra a Figura 35, na porção Leste do estado está localizada a mesorregião **Metropolitana do Recife**, a qual faz divisas com o oceano Atlântico (a Leste) e com a Mata Pernambucana (a Oeste). Essa mesorregião tem uma área territorial de 2.936,23km² e é formada pela Região Metropolitana do Recife (RMR) e pelo distrito estadual de Fernando de Noronha, que juntos, totalizam uma população de 3.890.145 habitantes.

A Região Metropolitana do Recife é formada por quatorze municípios⁴ e reúne 41,9% da população pernambucana em 2,8% da área total do estado. A RMR concentra ainda a maior parte das indústrias e empreendimentos relacionados aos setores de comércio e serviços. O Produto Interno Bruto (PIB) desta região, que foi de 75,9% em 2012, também é o maior do estado.

Considerando os aspectos fisiográficos, a RMR se caracteriza por apresentar tabuleiros costeiros sedimentares, praias, restingas e plainos alagadiços. Segundo a Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco (CONDEPE/FIDEM) sua paisagem é composta pela floresta tropical atlântica, manguezais e restingas e seu clima é o quente e úmido, com altas temperaturas.

A **Mata Pernambucana** (ou zona da Mata) está localizada entre as mesorregiões Metropolitana do Recife e Agreste Pernambucano e possui uma área total de 8.843,06km², onde vivem cerca de 1.372.472 pessoas. Sua região é usualmente diferenciada em dois ambientes: a Mata Norte que é formada por 19 municípios, onde se destacam os municípios de Goiana, Carpina, Timbaúba e Paudalho que são também os mais populosos; e a Mata Sul que é formada por 24 municípios, dentre eles Palmares, Sirinhaém e Vitória de Santo Antão.

Em grande parte da extensão territorial da zona da Mata, são encontrados fragmentos de florestas nativas de Mata Atlântica juntamente com amplas áreas destinadas ao cultivo da cana-de-açúcar. Seu relevo tem a forma mamelonar, com altitudes que aumentam na medida em que se adentra em direção ao interior. Na transição para o Agreste, está localizada a Serra das Russas, que, em realidade, constitui a borda ocidental do planalto da Borborema. O clima predominante nessa mesorregião é o clima tropical úmido, com temperaturas médias de 24°C no inverno e 27°C no verão. A umidade relativa do ar e os índices pluviométricos são, em geral, elevados.

⁴ Os municípios que formam a RMR são: Abreu e Lima, Araçoiaba, Cabo de Santo Agostinho, Camaragibe, Igarassu, Ilha de Itamaracá, Ipojuca, Itapissuma, Jaboatão dos Guararapes, Moreno, Olinda, Paulista, Recife e São Lourenço da Mata.

O **Agreste Pernambucano** é formado por 71 municípios e limita-se com a Mata e o Sertão Pernambucano. Sua área territorial é de 25.528,90km² e sua população é de 2.340.201 habitantes, de acordo com dados do IBGE.

Por estar situado numa área de transição, entre a Mata Pernambucana (região caracterizada pela presença da mata atlântica bem como pelo clima tropical, com alta umidade relativa do ar) e o Sertão (caracterizado pela caatinga e pelo clima semiárido, com chuvas escassas e mal distribuídas ao longo do ano), o Agreste Pernambucano apresenta uma paisagem composta pela caatinga hipoxerófila e pela mata serrana. Seu relevo é composto por maciços residuais, com vários sistemas de dobramentos lineares (planalto da Borborema) e também por áreas elevadas (brejos de altitude). O clima predominante é o tropical úmido, com forte presença de chuvas entre as estações do outono e inverno.

O **Sertão Pernambucano** situa-se entre as mesorregiões do Agreste Pernambucano e do São Francisco Pernambucano. É composto por 41 municípios e possui uma área territorial é de 39.531,07km², onde vivem 1.046.088 habitantes.

O Sertão está assentado sobre um embasamento predominantemente cristalino, que dificulta a formação de lençóis subterrâneos e, conseqüentemente, o acúmulo de água. Seu relevo é constituído por áreas planas com deposição de sedimentos. Sua paisagem é composta pela presença da caatinga hipo e hiperxerófila, cerrados e mata serrana. Esta mesorregião apresenta ainda um regime de chuvas irregular e baixos índices pluviométricos, com médias anuais inferiores a 700mm, que contribuem para periódicas ocorrências do fenômeno da seca. O clima predominante é o semiárido, com temperaturas médias no inverno de 22°C e no verão de 25°C e baixos índices de umidade relativa do ar.

A mesorregião do **São Francisco Pernambucano** faz limite com a mesorregião do Sertão e é composta por 15 municípios, distribuídos numa área de 25.296,98km², onde vivem 628.821 habitantes. Sua região é caracterizada por ser circundada pela margem esquerda do rio São Francisco, o qual faz divisa natural com o estado da Bahia. Tal como o Sertão, o relevo dessa mesorregião é composto por extensas áreas de superfícies planas e, em sua paisagem, também são encontrados os biomas da caatinga (hipo e hiperxerófila), cerrado e mata serrana. O clima predominante é o semiárido, com temperaturas médias no inverno de 25°C e no verão de 27°C.

A Tabela 08 sintetiza as principais características das cinco mesorregiões do estado de Pernambuco.

Tabela 08 – Principais Características das Cinco Mesorregiões do Estado de Pernambuco.

Mesorregião	Área (km²)	População (habitantes)	Quantidade de Municípios
Metropolitana do Recife	2.936,23	3.890.145	14 e um distrito
Mata Pernambucana	8.843,06	1.372.472	43
Agreste Pernambucano	25.528,90	2.340.201	71
Sertão Pernambucano	39.531,07	1.046.088	41
São Francisco Pernambuco	25.296,98	628.821	15

As informações apresentadas na Tabela 08 foram obtidas no IBGE. Os dados de população representam valores estimados no ano de 2014.

3.2.2 Informações sobre Infraestruturas

3.2.2.1 Infraestrutura de Transporte

O estado de Pernambuco possui um sistema de transporte que inclui os modais rodoviário, aeroviário, hidroviário, ferroviário e dutoviário.

Com relação à infraestrutura rodoviária, o estado dispõe de 2.903,30km de rodovias federais e 3.615,80km de rodovias estaduais, de acordo com dados do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) e do Departamento de Estradas de Rodagem de Pernambuco (DER-PE), respectivamente. Além dessas rodovias, existem outras vias estaduais, de caráter secundário, que completam a rede de comunicação rodoviária no Estado. Entre as principais rodovias federais que cortam Pernambuco estão as rodovias longitudinais BR-101, BR-104, BR-116, a rodovia transversal BR-232 e a rodovia de ligação BR-407.

Para o modal aeroviário, o Estado dispõe de dois complexos aeroportuários segundo a Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO): o complexo aeroportuário do Aeroporto Internacional do Recife/Guararapes – Gilberto Freyre, com sítio aeroportuário de 4.229.140,40m² e capacidade de 16,5 milhões de passageiros ao ano; e o complexo aeroportuário do Aeroporto Internacional de Petrolina – Senador Nilo Coelho que tem sítio aeroportuário de 4.101.125m² e capacidade de 1,5 milhões de passageiros ao ano. Além desses complexos, o estado possui 19 aeródromos, 12 públicos e 7 privados de acordo com a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), que apoiam as operações das aeronaves e complementam o embarque e desembarque de pessoas e cargas no estado.

Pernambuco possui também infraestruturas hidroviárias para o transporte de carga e de passageiros. De acordo com a Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), a principal hidrovia que passa pelo Estado é a hidrovia do São Francisco. O Estado possui também dois portos responsáveis pelo transporte marítimo na região: porto do Recife, localizado na parte centro-leste do Recife, na confluência e às margens dos rios Capibaribe e Beberibe, no local onde deságua no oceano Atlântico; e o porto de Suape, localizado no litoral Sul do estado, entre a foz dos rios Ipojuca e Massangana, nos municípios de Ipojuca e Cabo de Santo Agostinho. Há ainda um terceiro porto, o porto de Petrolina, que está situado na margem esquerda do rio São Francisco e integra a hidrovia de São Francisco.

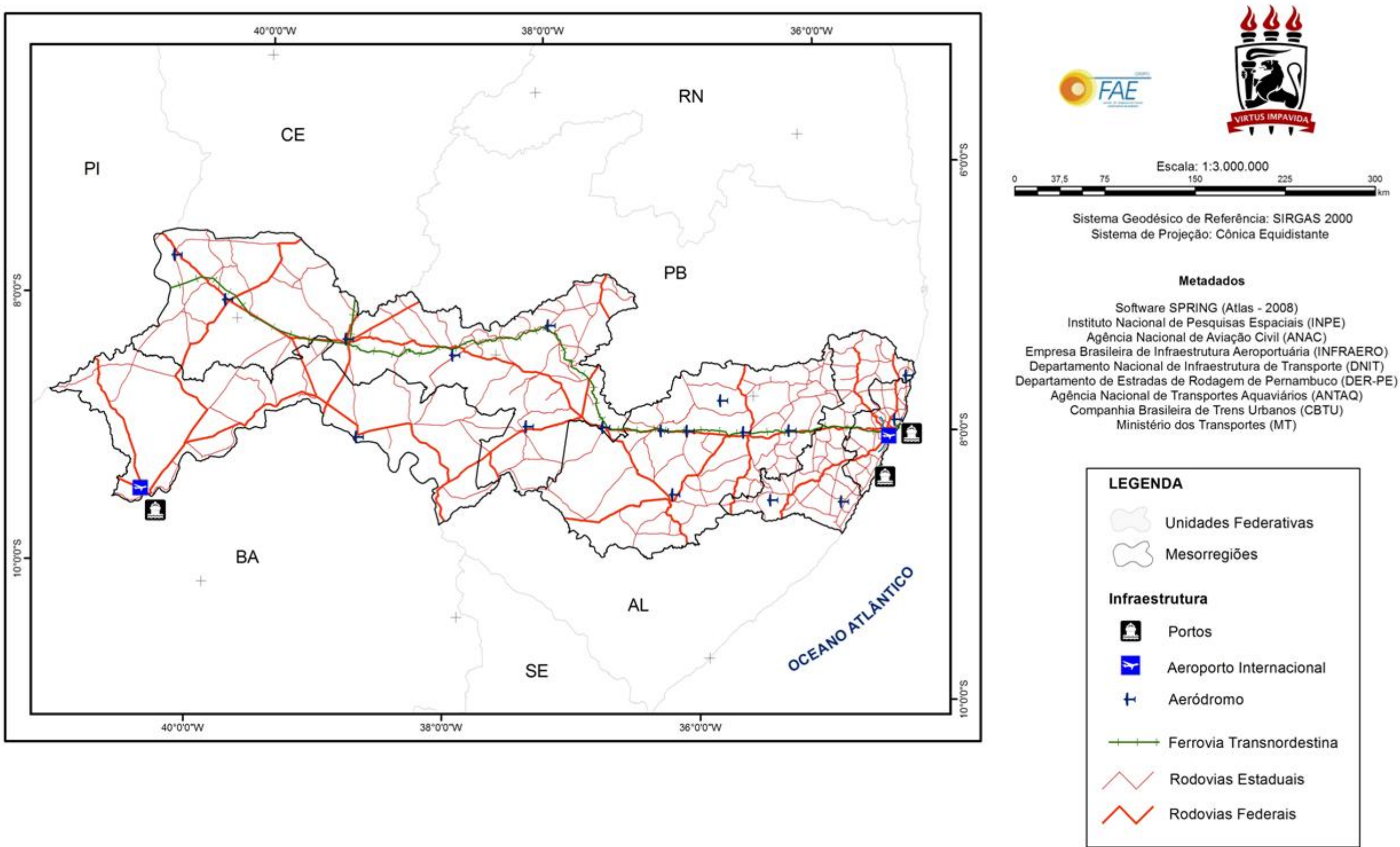
Para o modal ferroviário, o estado dispõe de um sistema destinado ao transporte de passageiros, administrado pela Companhia Brasileira de Trens Urbanos (CBTU) através da Superintendência de Trens Urbanos do Recife (METROREC), que visa atender diretamente os municípios do Recife, Cabo, Jaboatão dos Guararapes e Camaragibe e, indiretamente, os demais municípios da Região Metropolitana do Recife (RMR), através da integração com o transporte rodoviário; e um projeto de logística integrada, a ferrovia Transnordestina, idealizado pela empresa Transnordestina Logística S/A.

O projeto de construção da ferrovia Transnordestina tem por objetivo atender a região Nordeste do Brasil, por meio da interligação da cidade de Eliseu Martins, no Piauí, aos portos de Pecém e Suape, localizados, respectivamente, nos estados do Ceará e Pernambuco. O projeto prevê a construção de uma ferrovia de 1.753km de extensão para escoar a produção agrícola e mineral da região com vistas a atender, principalmente, o mercado europeu. Estima-se que, em operação, a ferrovia Transnordestina transporte até 30 milhões de toneladas por ano, com destaque para minério de ferro, grãos e gipsita.

E finalmente para o modal dutoviário, Pernambuco dispõe de uma infraestrutura de dutovias voltada para transportar oleodutos, gasodutos e minerodutos. Um dos principais gasodutos que corta o estado, o Gasoduto Nordeste, tem 424km de extensão e capacidade de transporte de 313 milhões de m³/ano de gás natural. O transporte de carga por dutovia é feito também no porto de Suape. De acordo com a ANTAQ, os principais produtos transportados são os compostos químicos MonoEtilenoGlicol e o butadieno, que partem do Terminal Tequimar, na área do porto, até as indústrias PET e Lanxess, respectivamente.

A Figura 36 (Mapa de Infraestrutura de Transporte do Estado de Pernambuco) apresenta os principais elementos de infraestrutura de transporte no Estado.

Figura 36 – Mapa de Infraestrutura de Transporte do Estado de Pernambuco



3.2.2.2 Infraestrutura do Sistema Elétrico

De acordo com o Banco de Informações de Geração (BIG) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o **Sistema de Geração** de Energia Elétrica em Pernambuco é composto por uma Usina Hidrelétrica (UHE), quatro Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), nove Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH), nove Centrais Geradoras Eólicas (EOL), dez Centrais Geradoras Solar Fotovoltaica (UFV) e cinquenta e duas Usinas Termelétricas (UTE), totalizando 85 usinas, que juntas, apresentam uma capacidade de geração de 3.481.354,47kW. Entre as principais usinas do estado estão a UHE Luiz Gonzaga que gera 1.479.600kW, e as Termelétricas Termopernambuco, Suape II e Pernambuco III que geram, respectivamente, 532.755,70kW, 381.259kW e 200.790kW.

Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME) e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o **Sistema de Transmissão** do Estado é composto por três linhas de transmissão de 500kV e quatro linhas de transmissão de 230kV. Essas linhas partem do Complexo de Paulo Afonso – Luiz Gonzaga – Xingó e suprem a subestação de Angelim (500/230/69kV), localizada em Pernambuco. Além dessas linhas, o Estado dispõe ainda de um circuito de 500kV existente entre a subestação de Messias, situada no estado de Alagoas, e a subestação Recife II, localizada em Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco. Existem ainda dois circuitos de 500kV e três de 230kV entre as subestações Angelim e Recife II.

O atendimento de energia elétrica a RMR é feito a partir da subestação Recife II, em circuitos de 230kV, que alimentam as subestações de Pirapama, Mirueira, Pau Ferro e Bongü. O Agreste Pernambucano, por sua vez, é atendido por três circuitos de 230kV, provindos de Angelim até a subestação de Tacaimbó, ambas localizadas em Pernambuco. Já o suprimento do Sertão Pernambucano é efetuado por meio da subestação Juazeiro (230/69kV), situada na Bahia, e pela subestação Bom Nome, localizada em São José do Belmonte, Pernambuco.

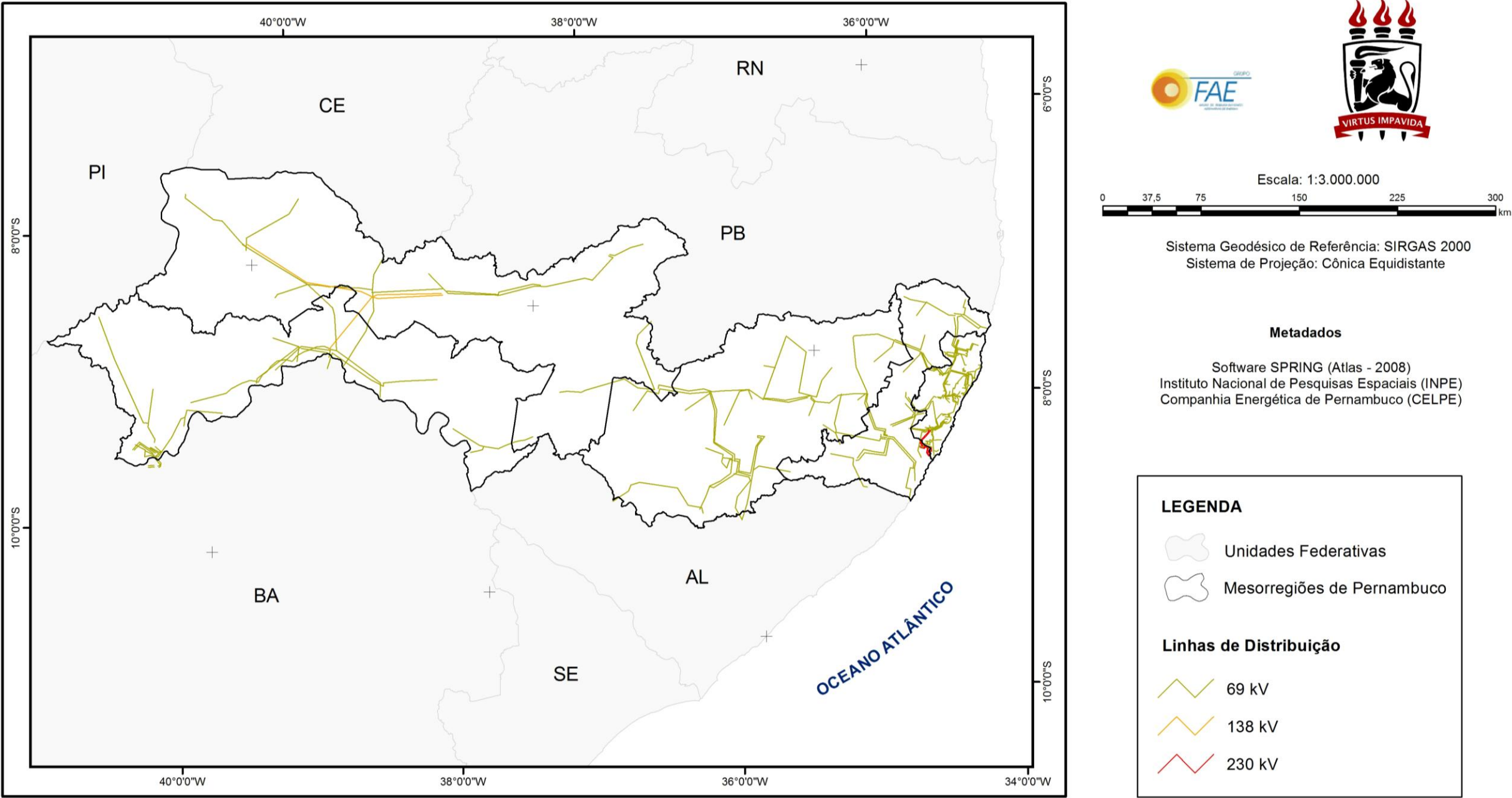
A ligação do sistema elétrico de Pernambuco com o estado da Paraíba, por exemplo, é feita através de circuitos 230kV existentes entre as subestações Angelim (PE) - Campina Grande II C1 (PB), Tacaimbó (PE) - Campina Grande II C1 e C2 (PB), Pau Ferro (PE) - Campina Grande II C1 e C2 (PB), Goianinha (PE) - Mussurê C1 C2 e C3 (PB), e Goianinha (PE) - Campina Grande II (PB). Já a interligação com Alagoas é efetuada por meio de três linhas de transmissão de 230kV, existentes entre as subestações de Angelim (PE) e Messias (AL).

Há ainda a subestação Suape II (500/230kV) seccionando a linha transmissão de 500kV entre Messias e Recife II. Tal subestação possibilitou escoar a oferta de geração térmica vencedora dos últimos leilões de energia que se conecta nesta subestação.

O **Sistema de Distribuição** de energia elétrica de Pernambuco é de responsabilidade da Companhia Energética de Pernambuco (CELPE), o qual atende também o município de Pedras do Fogo, localizado na Paraíba. O sistema tem área de concessão de 98.546,70km² e é formado por linhas de distribuição de 13,8kV, de 69/138kV e de 380/220kV que apresentam, respectivamente, 73.162,22km, 4.198,38km e 53.401,54km de extensão. A capacidade de geração própria é de 4,372MVA e as potências instaladas nas subestações e na rede de distribuição são, respectivamente, 3.002,97MVA e 2.887,27MVA.

O Mapa da Figura 37 (Mapa das Linhas de Distribuição do Estado de Pernambuco) ilustra somente os elementos do Sistema de Distribuição do estado devido à indisponibilidade de dados espaciais dos Sistemas de Geração e Transmissão no momento de realização desta pesquisa.

Figura 37 – Mapa das Linhas de Distribuição do Estado de Pernambuco



Do Mapa da Figura 37, verifica-se que as linhas de 69kV são as que predominam em Pernambuco, estando presente em todas as mesorregiões. Por outro lado, as linhas de 138kV são encontradas somente no Sertão e no São Francisco Pernambucano; e as linhas de 230kV, na parte limítrofe das mesorregiões Metropolitana do Recife e Mata Pernambucana.

Importante observar que na parte central do estado onde estão situados os municípios Floresta e Betânia existe um vazio de informações acerca das linhas de distribuição. Outra região com características similares é o extremo Oeste do Estado, no limite das mesorregiões do Sertão e São Francisco Pernambucano, onde estão localizados os municípios de Santa Filomena, Dormentes, Santa Cruz e Lagoa Grande.

3.2.3 Demografia e Consumo de Energia Elétrica

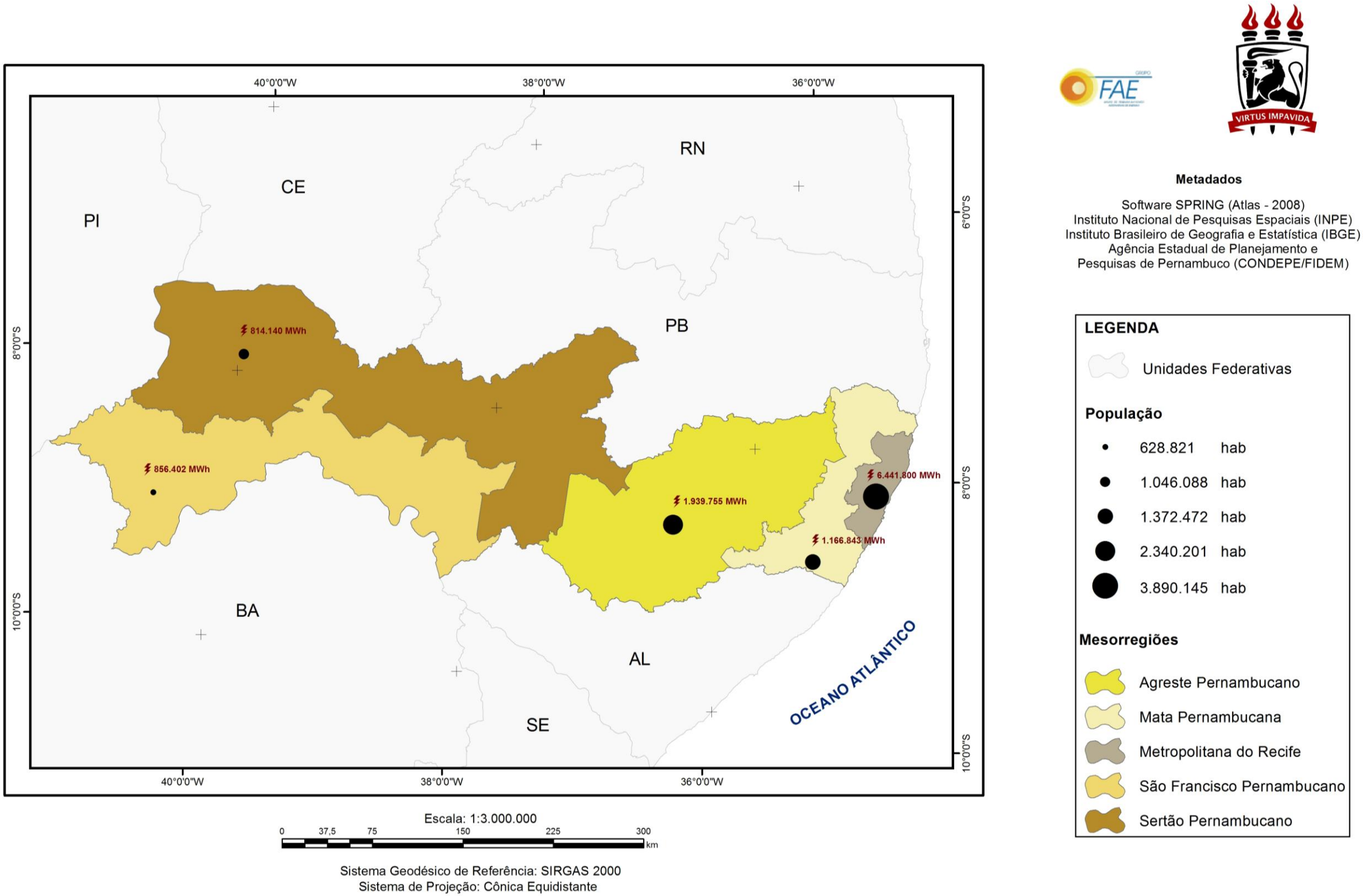
Segundo o IBGE, a população de Pernambuco em 2010 era de 8.796.448 habitantes. Desse total, aproximadamente 80,17% residiam nas áreas urbanas enquanto que 19,83% viviam em áreas rurais. Os homens representavam 48,1% da população e as mulheres 51,9%. A composição étnica da população era formada pelos percentuais de 35,5% para os pardos e amarelos, 23,5% para os indígenas, 22,5% para os negros e 14,1% para os brancos.

No ano de 2014, a população estimada em Pernambuco foi de 9.277.727 habitantes. Considerando a distribuição dessa população nas mesorregiões do Estado, verifica-se que a maior parcela da população está situada na mesorregião Metropolitana do Recife (3.890.145 habitantes), seguidas das mesorregiões do Agreste (2.340.201 habitantes) e Mata (1.372.472 habitantes). Em contrapartida, as áreas menos populosas são o Sertão (1.046.088 habitantes) e o São Francisco Pernambucano (608.821 habitantes).

Com relação ao consumo de energia elétrica, se verifica que o estado registrou, entre 2012 e 2014, um aumento no consumo total em 2013 (12.935GWh) com relação ao ano de 2012 (11.832GWh); e um decréscimo entre o ano de 2014 (11.218,93GWh) e o de 2013 (12.935GWh), segundo dados da EPE e da CELPE. Os setores que mais contribuíram para a obtenção do valor apresentado em 2014 foram o residencial, o industrial e o comercial, com demandas respectivas de 4.752,35GWh, 2.465,68GWh e 1.590,32GWh. Os demais setores (setor rural, de poderes públicos, entre outros), totalizaram 2.410,57GWh de potência.

Uma ilustração do quantitativo populacional e o consumo de energia elétrica em 2014 para as mesorregiões de Pernambuco são apresentados na Figura 38 (Mapa de Demografia x Consumo de Energia das Mesorregiões de Pernambuco).

Figura 38 – Mapa de Demografia x Consumo de Energia Elétrica em Pernambuco



Da Figura 38, se observa que as três mesorregiões mais populosas – Metropolitana do Recife, Agreste e Mata Pernambucana – foram também as que mais demandaram energia elétrica no estado em 2014, com consumos respectivos de 6.441.800MWh, 1.939.755MWh e 1.166.843MWh. Por outro lado, o Sertão Pernambucano e o São Francisco Pernambucano consumiram, respectivamente, 814.140MWh e 856.402MWh de eletricidade.

3.3 Procedimentos Metodológicos

Nesta pesquisa são apresentadas duas metodologias distintas para a definição de áreas potenciais à instalação de usinas solares termoeletricas de coletores cilíndrico parabólicos em Pernambuco: o Método baseado no Processo Analítico Hierárquico (Método AHP) e o Método do Custo de Produção de Eletricidade.

Com a utilização do **Método AHP**, questões de ordem técnica, econômica e ambiental foram consideradas para a implantação das usinas solares. Neste método, o problema da localização foi dividido em níveis hierárquicos, como pressupõe os axiomas do método AHP, visando estabelecer alternativas de resolução, para uso na definição das classes de aptidão no território pernambucano.

Por outro lado, no **Método do Custo de Produção de Eletricidade**, a avaliação do potencial técnico, ambiental e econômico para a instalação das usinas solares foi feita com base no custo nivelado da eletricidade LCOE. Para uma usina solar localizada hipoteticamente na área de estudo, o custo foi calculado considerando-se a produção anual de energia elétrica e os custos de investimento, de infraestrutura e de operação e manutenção do sistema ao longo de sua vida útil.

Ambas as metodologias utilizaram os SIG e outras tecnologias do Geoprocessamento para apoiar a definição das áreas aptas à instalação no território pernambucano.

Os procedimentos metodológicos realizados para a aplicação de cada metodologia previamente explicada estão apresentados nos tópicos 3.3.1 e 3.3.2 desta Tese.

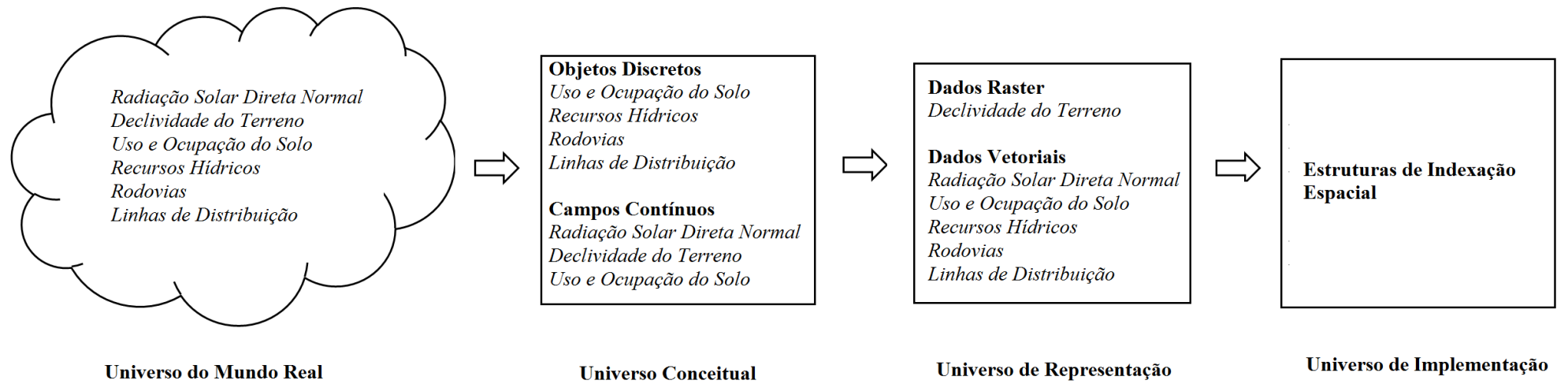
3.3.1 Metodologia da Localização pelo Uso do Método AHP

3.3.1.1 Modelagem Conceitual de Dados Geográficos – Método AHP

Os objetos e fenômenos do mundo real são muito complexos para permitir uma representação completa, mesmo considerando os recursos tecnológicos disponíveis nos dias atuais. Em virtude disso, é necessário construir uma abstração dos objetos e fenômenos do mundo real, de modo a obter uma forma de representação conveniente, embora simplificada, que seja adequada às finalidades das aplicações.

A abstração dos objetos e fenômenos do mundo real é uma parte importante da criação da Base de Dados Espaciais (BDE). Ela funciona como um recurso que ajuda a compreender o sistema, dividindo-o em componentes separados. Cada um desses componentes pode ser visualizado em diferentes níveis de complexidade, conforme a necessidade de compreensão e representação das diversas entidades de interesse do sistema de informação e suas interações. Uma ilustração da abstração do mundo real para a localização pelo uso do Método AHP está mostrada na Figura 39.

Figura 39 – Processo de Abstração do Mundo Real para o Método AHP



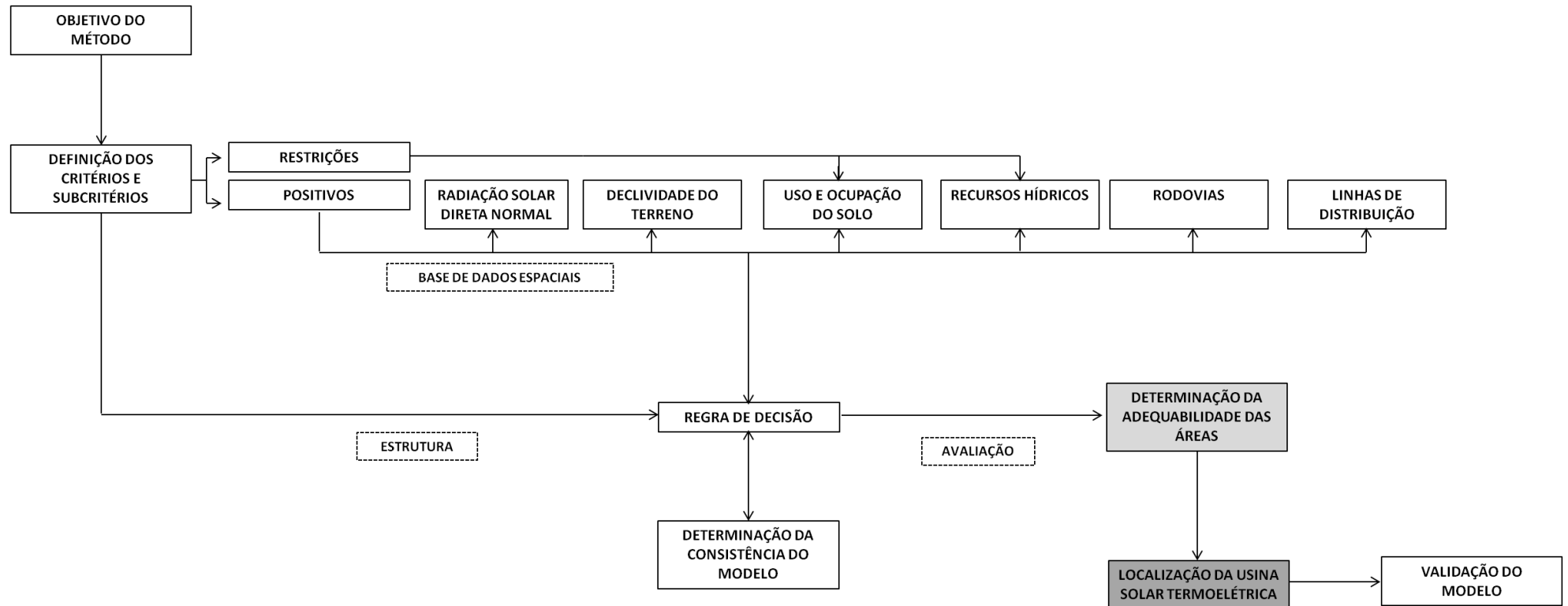
Na Figura 39 está mostrado o processo de abstração do mundo real para a localização pelo uso do Método AHP. No **Universo do Mundo Real** estão os fenômenos geográficos a serem modelados. No **Universo Conceitual**, a informação geográfica é representada no SIG segundo a visão de objetos discretos e campos contínuos, em um alto nível de abstração. No **Universo de Representação**, foram usados dois modelos de dados para tratar o problema da representação digital: a estrutura vetorial e a matricial (ou raster). E, finalmente, no **Universo de Implementação** estão as estruturas de indexação espacial, utilizadas para a construção do sistema.

3.3.1.2 Procedimentos Metodológicos Realizados para a Aplicação do Método AHP

A aplicação do Método AHP para a localização de usinas solares termoeletricas em Pernambuco iniciou-se com a definição explícita do objetivo a ser alcançado, tal como ilustra a Figura 40. Na sequência, foram definidos os critérios e os subcritérios do estudo, permitindo caracterizar e quantificar todas as variáveis envolvidas no processo. Nesta etapa foi construída a BDE. Como passos posteriores, foram definidas as regras de decisão e efetuados os cálculos de consistência para os diferentes cenários do estudo. Por fim, foi determinado o grau de aptidão do território pernambucano para a implantação dos projetos CSP como também foi realizada a validação do modelo.

Os procedimentos metodológicos realizados para a definição das áreas potencialmente disponíveis estão descritos nos tópicos 3.3.1.3 a 3.3.1.8.

Figura 40 – Procedimentos Metodológicos Realizados para a Definição das Áreas Potenciais a partir do uso do Método AHP



3.3.1.3 Objetivo do Método

O objetivo do método é localizar áreas com potencial de instalação de usinas solares termoeletricas de coletores parabólicos em Pernambuco, segundo os requerimentos definidos pela regra de decisão em cada cenário do estudo.

3.3.1.4 Definição dos Critérios e Subcritérios

Para avaliar o problema da localização das usinas solares em Pernambuco, quatro critérios foram definidos: **Climático**, **Topográfico**, **Localização** e **Ambiental**. Estes, por sua vez, foram subdivididos em subcritérios, caracterizando assim os indicadores positivos (Tabela 09) e as restrições (Tabela 10) do estudo.

Para apresentação na Tabela 09, os indicadores positivos, exceto aqueles relacionados à declividade do terreno e ao uso e ocupação do solo, foram agrupados em cinco classes usando a definição *Natural Breaks (Jenks)*. Esta definição permite uma exposição natural do dado espacial a partir da identificação de grupos de valores similares e da maximização da diferença entre as classes, (LONGLEY et al., 2005).

Para a declividade do terreno, as classes foram definidas de modo manual, visando apresentar regiões com declividade menor ou iguais a 5% (em três intervalos 0-2%, 2-4% e 4-5%) e as regiões com declividade maior que 5%. Já para as informações relativas ao uso e ocupação do solo, a classificação adotada foi baseada no atributo de aptidão agrícola dos solos, o qual foi definido pela instituição governamental responsável pelo dado espacial.

Tabela 09 – Especificação dos Critérios, Subcritérios e Indicadores Positivos.

Critérios	Subcritérios	Indicadores Positivos
Climático	Radiação Solar Direta Normal	3,8 – 4,2 kWh/m².dia
		4,2 – 4,6 kWh/m².dia
		4,6 – 5,0 kWh/m².dia
		5,0 – 5,4 kWh/m².dia
		5,4 – 5,8 kWh/m².dia
Topográfico	Declividade do Terreno	0 – 2%
		2 – 4%
		4 – 5%
		> 5%
Localização	Distância aos Recursos Hídricos	0 – 7,8 km
		7,8 – 17,6 km
		17,6 – 27,7 km
		27,7 – 39,9 km
		39,9 – 69,2 km
	Distância às Rodovias	0 – 2,5 km
		2,5 – 5,7 km
		5,7 – 9,6 km
		9,6 – 15,0 km
		15,0 – 29,2 km
	Distância às Linhas de Distribuição	0 – 6,8 km
		6,8 – 15,7 km
		15,7 – 26,6 km
		26,6 – 40,9 km
		40,9 – 64,7 km

Continuação da Tabela 09

CrITÉRIOS	SubcritÉRIOS	Indicadores Positivos
Localização	Distância às Áreas Urbanas e de Expansão Urbana	0 – 11,4 km
		11,4 – 23,1 km
		23,1 – 37,4 km
		37,4 – 57,2 km
		57,2 – 93,5 km
Ambiental	Uso e Ocupação do Solo	Aptidão Regular
		Aptidão Regular a Restrita
		Aptidão Restrita
		Aptidão Restrita a Desfavorável
		Aptidão Desaconselhável

Tabela 10 – Indicadores Negativos ou Restrições.

CrITÉRIOS	SubcritÉRIOS	Restrições
Ambiental	Uso do Solo	Unidades de Conservação
		Remanescentes de Mata Atlântica
		Territórios Indígenas
		Territórios Quilombolas
		Áreas de Alta Aptidão Agrícola
Localização	Recursos Hídricos	Áreas Urbanas e de Expansão Urbana
		Corpos d'Água

Uma vez definidos os critérios e os subcritérios do estudo, fez-se a construção da BDE.

A estruturação de uma BDE é tarefa indispensável na implantação de qualquer SIG uma vez que reúne, de forma adequada, a informação espacial e atualizada do território com vistas às ações de planejamento, gestão e desenvolvimento de projetos de maneira eficaz e sustentável, (ALCÂNTARA e SÁ, 2011).

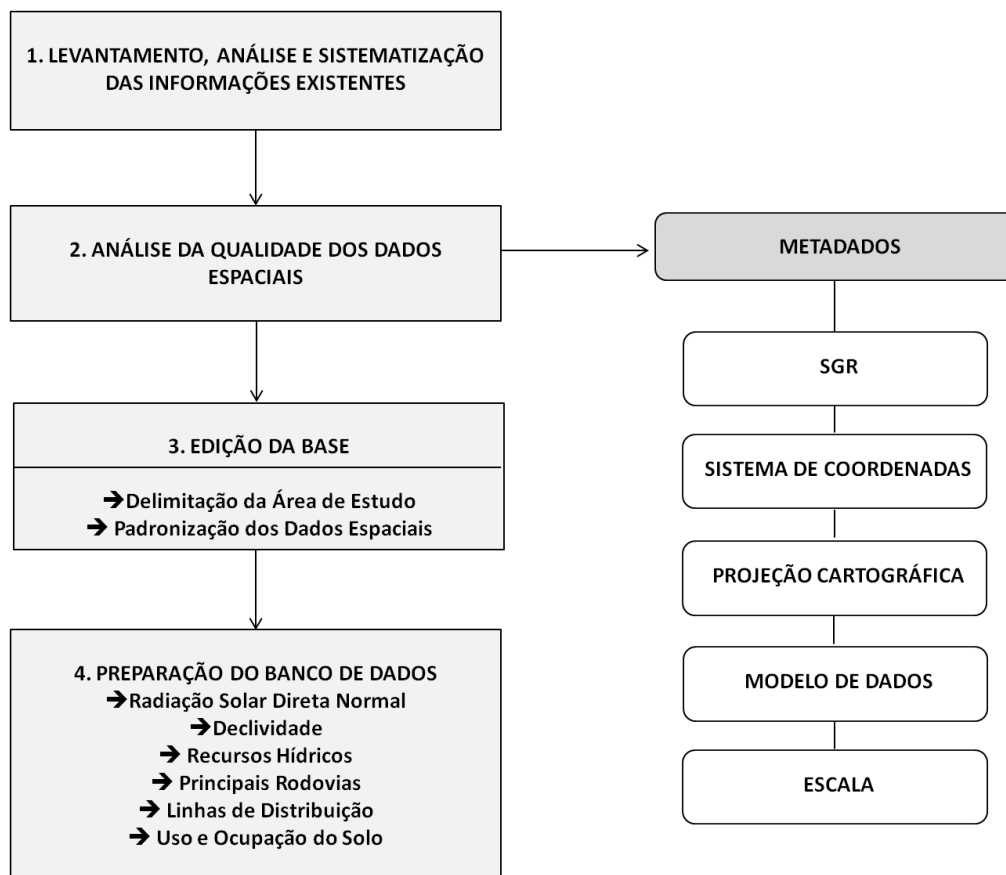
De acordo com SILVEIRA et al., (2008), a estruturação de uma BDE pode ser feita pelos processos de criação ou construção. O processo de criação é aplicado quando os dados espaciais não existem ou não estão disponíveis, cabendo assim à necessidade de coletá-los em campo por meio do uso das geotecnologias para aquisição de dados (Topografia, Geodésia, Sensoriamento Remoto, Aerofotogrametria). Por outro lado, a construção da BDE demanda conhecimentos multidisciplinares para a compatibilização dos dados espaciais e é realizada a partir de bases cartográficas já existentes e passíveis de serem inseridas em um SIG.

Um aspecto que deve ser considerado para a estruturação de BDE de utilização por grupos de usuários com múltiplos interesses, é a documentação do seu conteúdo (metadado) que sintetiza, entre outros, informações da coleta, aceção e acurácia que os dados possuem, (ALCÂNTARA e SÁ, 2011).

A estruturação da BDE deste estudo seguiu o processo de construção por existir dados espaciais disponíveis, nas instituições governamentais competentes, para aplicação no estudo de localização.

As etapas seguidas para a construção da BDE englobou as ações de levantamento, análise e sistematização das informações existentes, análise de qualidade nos dados espaciais, edição da base e preparação do banco de dados, conforme ilustra a Figura 41.

Figura 41 – Construção da Base de Dados Espaciais para Utilização no Método AHP



Na etapa inicial do processo de construção da BDE foram feitos o **Levantamento, a Análise e a Sistematização das Informações Existentes** dos dados espaciais necessários ao estudo de localização em Pernambuco. Na sequência, esses dados foram adquiridos junto aos órgãos governamentais competentes.

Uma vez adquiridos, fez-se a **Análise de Qualidade nos Dados Espaciais** objetivando identificar, principalmente, o conjunto de informações composto pelo Sistema Geodésico de Referência, Sistema de Coordenadas, Projeção Cartográfica, Modelo de Dados e Escala. A identificação destas informações é de extrema importância nos projetos desenvolvidos em SIG, uma vez que agrupa os metadados sobre os dados espaciais que serão usados, ao mesmo tempo em que evita o acontecimento das inconsistências cartográficas (quando não se observam a concordância e a coerência entre os vários dados espaciais que compõem um mapa, ocasionando contradições na representação geográfica, mesmo considerando o erro gráfico admissível para sua escala).

A etapa de **Edição da Base** foi realizada em ambiente SIG com auxílio dos softwares Spring 5.2.6 e ArcGIS 10.1. Como primeiro passo da edição fez-se a delimitação da área de estudo (o estado de Pernambuco, exceto a região do Distrito de Fernando de Noronha) das demais áreas. Na sequência foi feita a padronização dos dados espaciais, segundo o conjunto de informações citado no parágrafo anterior.

Para o Sistema Geodésico de Referência (SGR) foi usado o SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) que representa o sistema de referência oficial para o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) e para o Sistema Cartográfico Nacional (SCN). O SGR SIRGAS2000, é um sistema geocêntrico utilizado em substituição ao SGR SAD69 (*South American Datum of 1969*) que constituía o SGR oficial do país.

Como alguns dados espaciais estavam georreferenciados ao SGR SAD69, como, por exemplo, a Radiação Solar Direta Normal, foi feita a transformação de suas coordenadas para o SIRGAS2000, no software ArcGIS 10.1, por meio da inclusão dos parâmetros de transformação entre os sistemas e pelo uso das Equações Diferenciais Simplificadas de Molondenski⁵, ambos apresentados na Resolução do Presidente do IBGE N°1/2005 e que constam nos Anexos A e B deste documento.

Para o Sistema de Coordenadas, foi utilizado o Sistema de Coordenadas Geodésico (Latitude e Longitude) em virtude da área de representação (todo o estado de Pernambuco, exceto o Arquipélago de Fernando de Noronha) e da superfície de referência adotada (elipsoide).

A Projeção Cartográfica utilizada foi a Cônica Equidistante, ou simplesmente Projeção Cônica, que é caracterizada pela representação de pequenos países ou regiões que se estendem na direção Leste Oeste, como é o caso do estado de Pernambuco.

Os Modelos de Dados usados foram o vetorial e o matricial (ou *raster*). O primeiro foi utilizado para visualizar a distribuição espacial da maior parte das variáveis em Pernambuco, enquanto que o segundo foi utilizado para visualizar a declividade do terreno no estado e também para uso nas operações da Álgebra de Mapas. Por fim, a Escala utilizada foi a de 1:3.000000 para visualizações de toda a área de estudo nos Mapas em formato A3.

⁵ O modelo de Molondenski é o mais utilizado na transformação entre Sistemas Geodésicos de Referência e possui duas versões: a completa e a simplificada. Nesta última, a altitude é ignorada nas correções à latitude e à longitude.

Após a edição da base, foi realizada a **Preparação do Banco de Dados** onde foram organizadas as informações de todos os dados espaciais utilizados no estudo. Os dados estão dispostos a seguir:

a) Radiação Solar Direta Normal

A radiação solar direta normal é, segundo BROESAMLE et al., (2001), o parâmetro mais importante na indicação de áreas potenciais para a instalação de usinas solar termoeletrica. De fato, se considerarmos um coletor plano localizado na superfície terrestre e inclinado de um ângulo β em relação a horizontal, a radiação solar total (I_h) que atinge este plano num dado instante será dada pela soma de duas componentes: a radiação direta e difusa, como mostra a Equação 29:

$$I_c = I_{bn} \cos \theta + I_d \frac{\sin \beta}{\pi C} \quad (\text{Eq. 29})$$

Onde:

I_c = radiação solar na superfície do coletor;

I_{bn} = radiação solar direta normal;

θ = ângulo formado pelos raios com o plano horizontal;

I_d = radiação solar difusa que incide sobre o plano horizontal⁶;

β = ângulo de borda;

π = ângulo de incidência;

C = concentração geométrica.

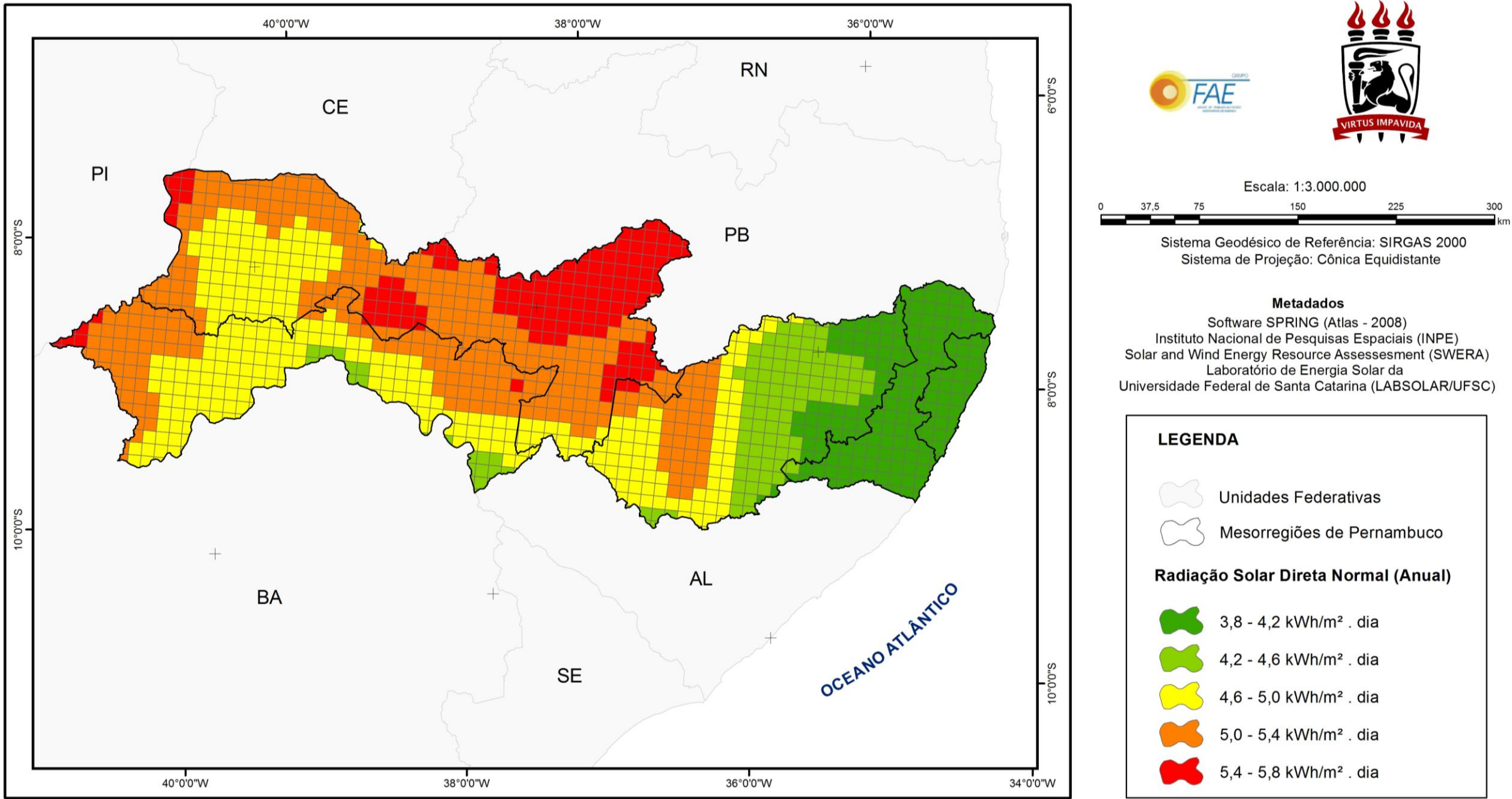
Nas usinas solar termoeletricas que apresentam uma razão de concentração geométrica considerada alta, definida no intervalo de $50 < C < 100$, por exemplo, a contribuição da difusa refletirá uma pequena fração (desprezível) da radiação solar incidente na superfície do coletor, ou seja, o coletor solar enxergará, praticamente, apenas a parcela direta da radiação solar incidente em sua superfície ($I_c \sim I_{bn}$). Por isso, o conhecimento da radiação solar direta normal em uma dada localidade é um fator imprescindível para os estudos de localização.

⁶ O termo referente à radiação solar difusa na Equação 29 está aproximada para a região angular onde a função aceitação angular é igual a 1.

De acordo com TIBA et al., (2012) a localidade onde será implantada a usina solar deverá apresentar o valor mínimo de radiação solar direta normal de $2.100\text{kWh/m}^2.\text{ano}$, ou seja, $5,75\text{kWh/m}^2.\text{dia}$ (valor diário médio anual) para assegurar a eficácia dos projetos CSP. Esse valor está um pouco acima do que usualmente se utiliza para a elaboração de estudos de viabilidade de instalação termoelétricas em escala mundial, que é de $5,0\text{kWh/m}^2.\text{dia}$.

Em Pernambuco, a distribuição espacial da radiação solar direta normal (valor diário médio anual) é apresentada no mapa da Figura 42. Os dados foram obtidos no SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*) e estão distribuídos em células de $10\text{km}\times 10\text{km}$. Para a apresentação no mapa, os dados foram organizados em cinco classes com intervalos iguais de $0,4\text{kWh/m}^2.\text{dia}$ (valor diário médio anual).

Figura 42 – Mapa da Radiação Solar Direta Normal (Anual) do Estado de Pernambuco



Analisando o mapa da Figura 42, se observa que os índices de radiação solar direta normal no Estado de Pernambuco variam de 3,8 a 5,8kWh/m².dia. Os valores mais altos (entre 5,4 a 5,8kWh/m².dia) estão localizados no Sertão Pernambucano e, em áreas isoladas do São Francisco Pernambucano. Já os menores valores (entre 3,8 a 4,2kWh/m².dia) predominam na porção Leste do estado, sobretudo nas mesorregiões Metropolitana do Recife e Zona da Mata.

Valores intermediários da radiação solar direta normal (entre 4,6 a 5,4kWh/m².dia) são os que predominam no estado, sendo localizados, sobretudo, nas mesorregiões do Agreste, Sertão e do São Francisco Pernambucano. No Sertão, por exemplo, podem ser visualizadas extensas áreas com índices de radiação solar definidos no intervalo de 5,0 a 5,4kWh/m².dia.

b) Declividade do Terreno

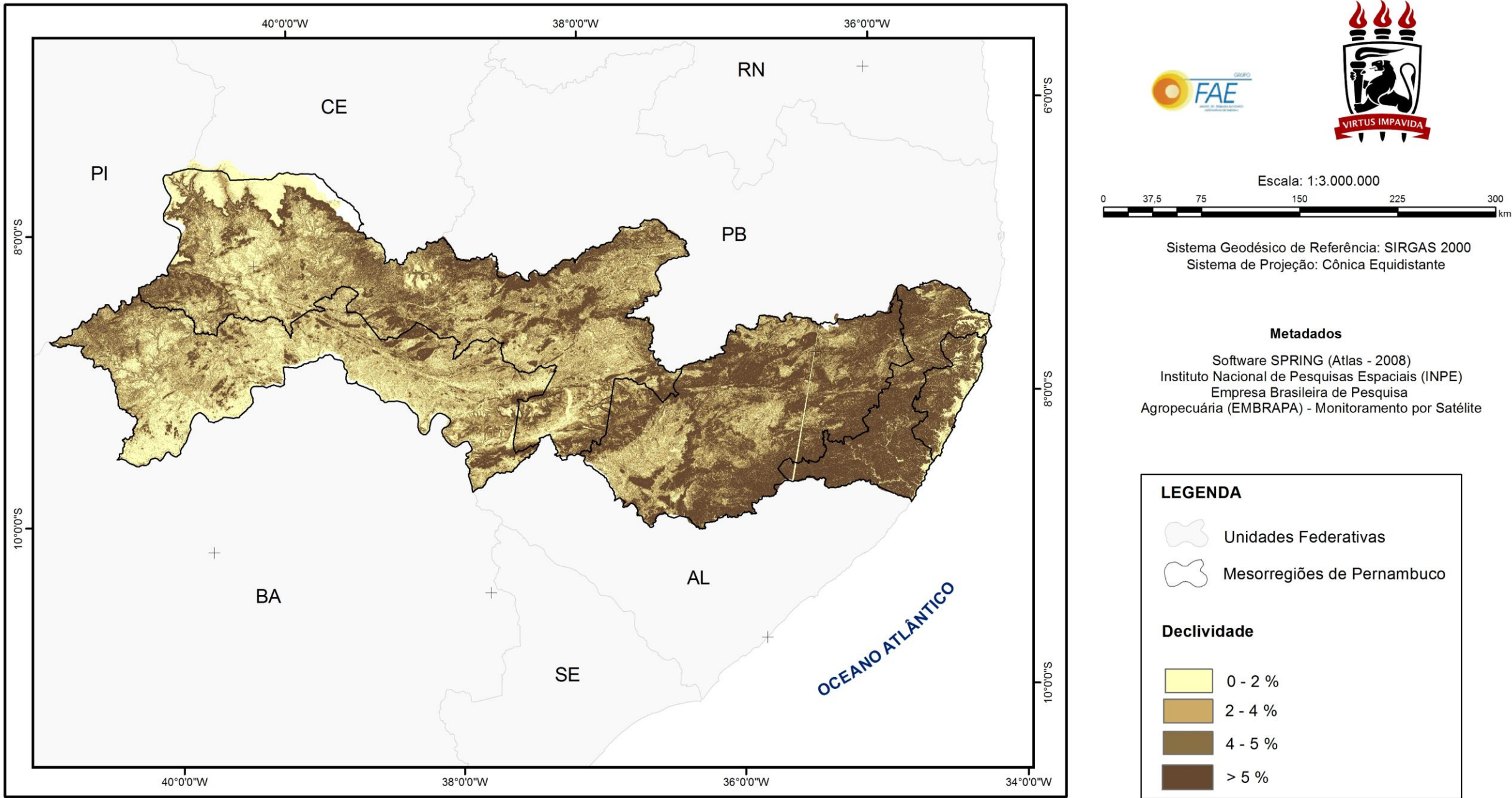
A declividade do terreno onde será implantada a usina solar determina a aceitabilidade do local segundo seu impacto no custo relativo à preparação e o nivelamento do terreno. Esse local deverá ser o mais plano possível, entretanto com inclinação suficiente para permitir uma drenagem natural do terreno. Com relação ao horizonte visual do campo de coletores solares, somente deverão ser permitidas obstruções, morros, árvores, torres, entre outras, com ângulos visuais menores que 10°, TIBA et al., (2012).

Para determinar a declividade do terreno em Pernambuco foram usadas imagens do Sensor de Abertura Sintética (SAR) usado na missão SRTM3 e que são disponibilizadas pela EMBRAPA – Unidade Monitoramento por Satélite. Essas imagens possuem formato geotiff (16 bits), resolução espacial de 90m e georreferenciamento ao Sistema Geodésico de Referência (SGR) WGS84, o qual é compatível com o SGR SIRGAS2000 para a escala de trabalho utilizada.

A determinação da declividade foi feita com o auxílio do *software* ArcGIS 10.1, onde foram feitas análises de qualidade nas imagens (sobretudo do Sistema Geodésico de Referência, Sistema de Coordenadas, Projeção Cartográfica e Escala); geração de mosaicos para cada fuso que corta o estado de Pernambuco (fusos 24 e 25); e, por fim, a geração da declividade em valores percentuais por meio do uso do recurso *Slope*.

A declividade do estado de Pernambuco é apresentada no Mapa da Figura 43. As informações foram georreferenciadas ao SGR SIRGAS2000 e representadas no Sistema de Coordenadas Geodésicas (latitude e longitude). Para a representação no Mapa, os valores da declividade foram agrupados em quatro classes: 0-2%, 2-4%, 4-5% e declividades maiores que 5% conforme mostrado a seguir.

Figura 43 – Mapa de Declividade do Estado de Pernambuco



Do Mapa da Figura 43 observa-se que os percentuais mais altos de declividade, da ordem de 4-5% e maiores que 5%, estão localizados, em sua maioria, nas mesorregiões Metropolitana do Recife, Mata Pernambucana e Agreste Pernambucano. Percentuais altos são também encontrados no Sertão e no São Francisco Pernambucano, sobretudo nos municípios de Triunfo, Santa Cruz da Baixa Verde, Quixabá, Solidão, Carnaubeira da Penha e Tacaratu.

Em contrapartida, declividades mais suaves (0-2%, 2-4%) são encontradas nas mesorregiões do Sertão e do São Francisco Pernambucano. Uma importante área que apresenta percentuais de declividades baixos encontra-se na parte Sul da mesorregião do São Francisco Pernambucano, sobretudo nos municípios de Itacuruba, Belém de São Francisco, Floresta, Petrolândia, Cabrobó, Orocó, Santa Maria da Boa Vista, Lagoa Grande e Petrolina, que são banhados pelo rio São Francisco.

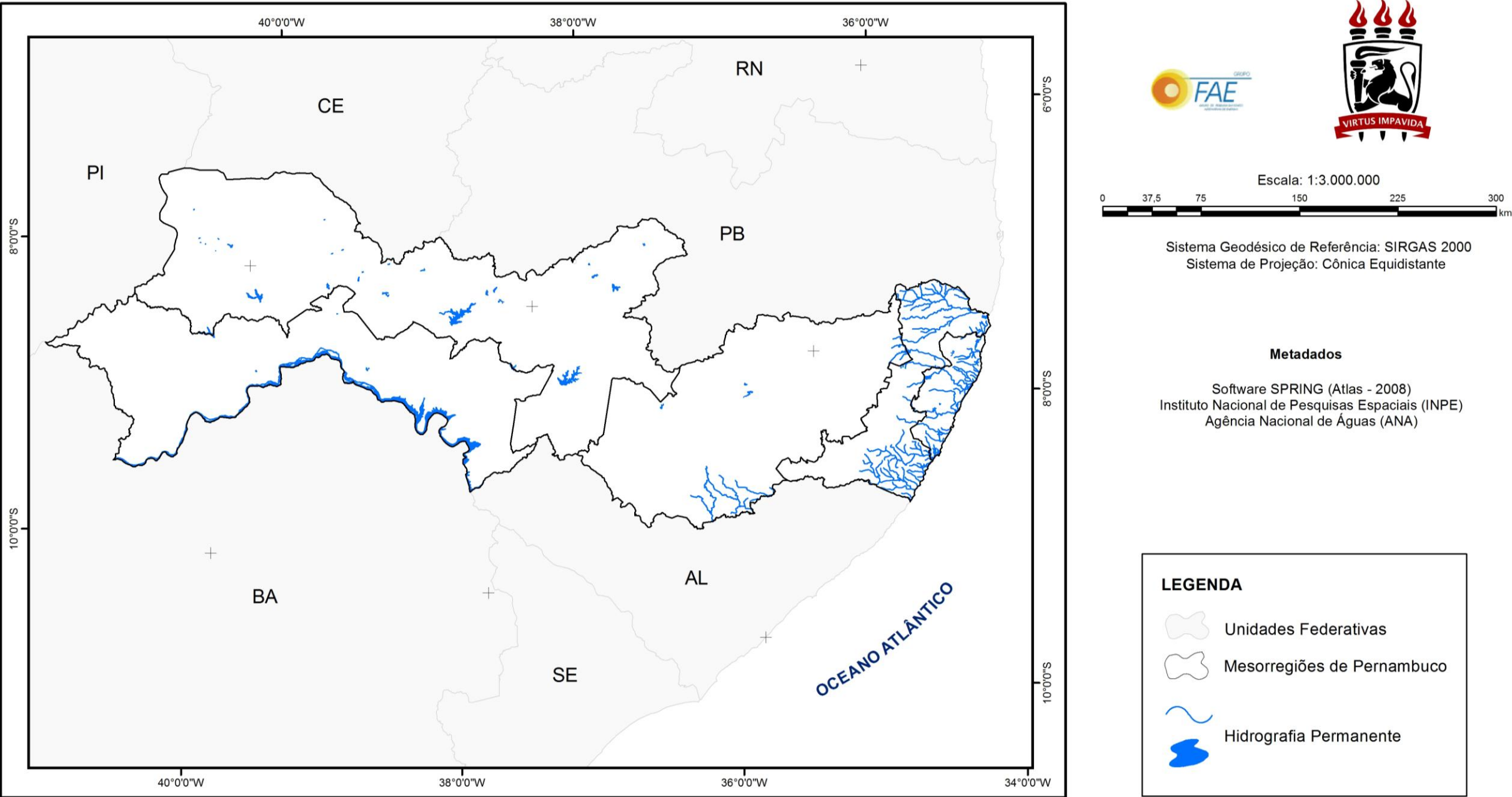
c) Distância aos Recursos Hídricos

A disponibilidade hídrica é um requisito muito importante nas usinas solares termoeletricas que fazem uso de sistemas de resfriamento úmido. Segundo KELLY (2006), uma usina de coletores cilíndricos parabólicos tipo SEGS, de 80MW, operando 350 dias no ano e 12 horas por dia, utiliza cerca de 2.000.000m³ de água. Desse total, 90% são destinados para as torres de refrigeração e o restante para a geração de vapor (8%) e limpeza dos espelhos (2%). O fluxo típico para as torres de refrigeração é de 320m³/h. Além disto, a água deve apresentar grau de pureza adequado para uso nas instalações da usina solar a fim de evitar incrustações e oxidações dos equipamentos.

A proximidade da usina solar com os recursos hídricos locais é um requisito importante na etapa de planejamento da inserção de projetos CSP. Isto porque as grandes distâncias entre esses recursos e o local de implantação da usina poderão acrescer os investimentos totais do projeto já que poderá demandar a construção de novas adutoras.

Os dados espaciais de recursos hídricos do estado de Pernambuco, mostrados na Figura 44, foram obtidos na ANA (Agência Nacional de Águas), por intermédio da INDE (Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais). Os dados espaciais apresentados representam apenas os recursos com caráter permanente do Estado, isto é, os recursos hídricos temporários não foram considerados no modelo.

Figura 44 – Mapa Hidrográfico do Estado de Pernambuco



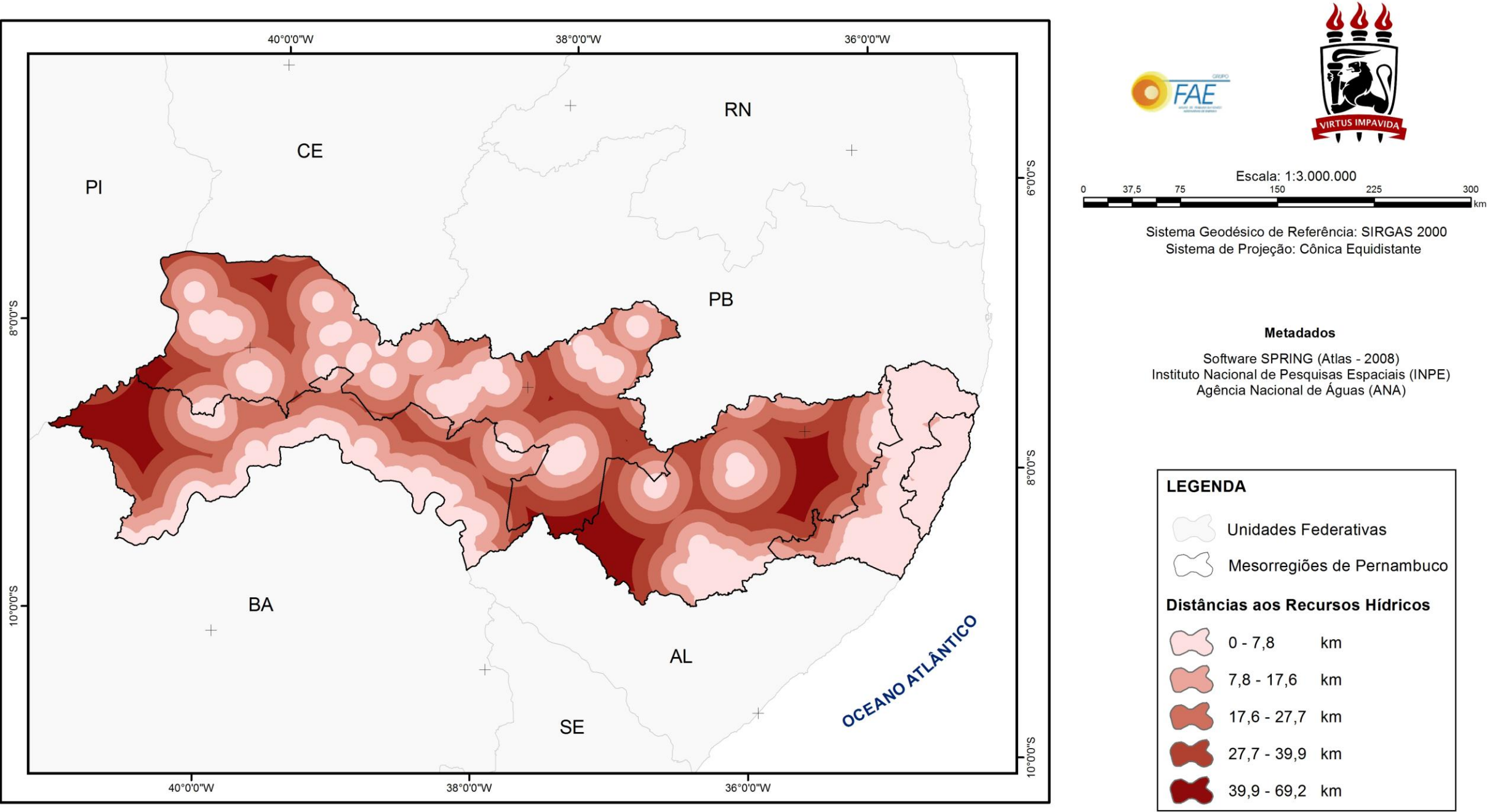
Do Mapa da Figura 44, observa-se que a maior concentração de recursos hídricos no estado está localizada na mesorregião Metropolitana do Recife e na parte Norte da Mata Pernambucana. Nas mesorregiões do Agreste, Sertão e São Francisco Pernambucano tais recursos são mais escassos.

No São Francisco Pernambucano, o principal corpo d'água é o rio São Francisco, cuja região hidrográfica encontra-se situada nos seguintes estados brasileiros: Bahia, Minas Gerais, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Goiás, além do Distrito Federal, abrangendo 521 municípios.

Com 2.700km de extensão, o rio São Francisco nasce na Serra da Canastra, em Minas Gerais, e escoar pelo sentido Sul-Norte pela Bahia e Pernambuco, quando altera seu curso para o Sudeste, chegando ao Oceano Atlântico na divisa entre Alagoas e Sergipe. Segundo a ANA, a área de drenagem do Rio é de 638.576km² (o que equivale a 8% do território brasileiro) e o potencial hidrelétrico aproveitado na bacia é de 10.473MW, distribuídos nas usinas Três Marias, Queimado, Sobradinho, Itaparica, complexo de Paulo Afonso e Xingó.

Para criar o *layer* de distâncias aos recursos hídricos foi usado o algoritmo *Euclidean Distance*, do ArcGIS 10.1, que retorna as distâncias euclidianas para um dado arquivo *raster*. Para tal determinação, os dados espaciais de recursos hídricos foram convertidos para *raster* de 90 metros de resolução espacial. Tal resolução foi escolhida visando manter conformidade com as informações de declividade do terreno. O Mapa que ilustra as distâncias para os recursos hídricos do estado de Pernambuco está mostrado na Figura 45.

Figura 45 – Mapa das Distâncias aos Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco



Do Mapa da Figura 45, observa-se que as maiores distâncias aos recursos hídricos (acima de 39,0km) são localizadas, especialmente, na mesorregião do Agreste Pernambucano, onde estão os municípios de Caruaru, Bezerros, Riacho das Almas, Agrestina, Itaíba e Águas Belas, e também na mesorregião do São Francisco Pernambucano, em trechos dos municípios de Afrânio, Dormentes e Petrolina.

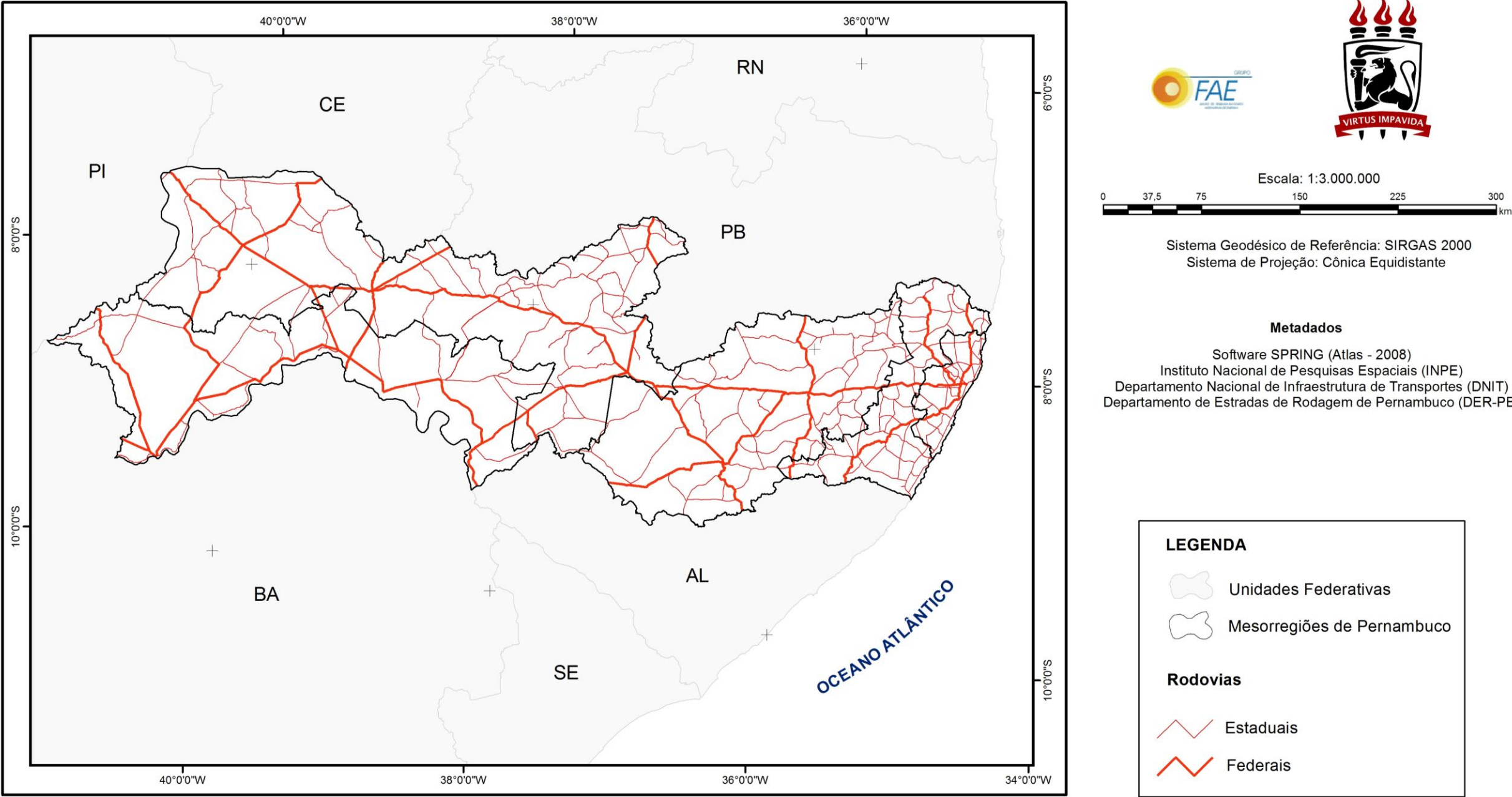
Em contrapartida, as menores distâncias (0 a 7,8km) são encontradas em todas as mesorregiões do Estado com destaque para a mesorregião do São Francisco Pernambucano, onde está o rio São Francisco, e as mesorregiões da Mata Pernambucana e Metropolitana do Recife, onde estão localizados vários mananciais hídricos como o rio Una em Barreiros e a represa de Tapacurá na região limítrofe dos municípios de São Lourenço da Mata e Vitória de Santo Antão.

d) Distância às Rodovias

Outro aspecto importante na implantação das usinas solares são as suas possibilidades de acesso. O acesso ao local de instalação da usina solar é relevante, principalmente, pela necessidade de transportar equipamentos de grande porte e frágeis como os espelhos. Assim, a proximidade deste fator ao local de implantação da usina também é requisito importante e poderá apresentar reflexos no custo geral da usina, se, por exemplo, demandar a expansão da malha viária para o atendimento de regiões favoráveis à implantação dos projetos CSP.

As principais rodovias que cortam o estado de Pernambuco estão mostradas na Figura 46. Os dados foram obtidos junto ao DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte) e ao DER-PE (Departamento de Estradas de Rodagem de Pernambuco), que trazem, respectivamente, informações sobre as rodovias federais e as rodovias estaduais de Pernambuco.

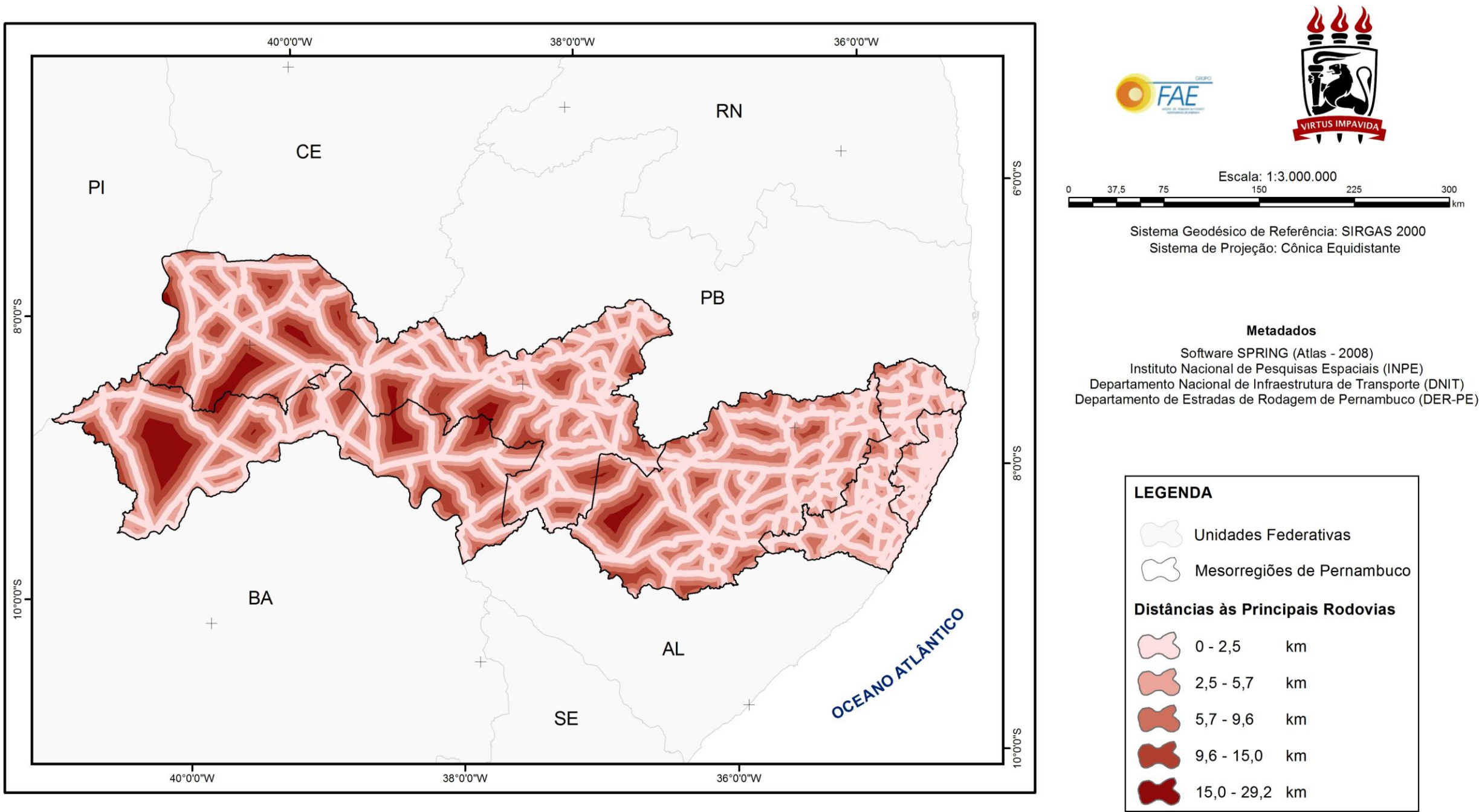
Figura 46 – Mapa Rodoviário do Estado de Pernambuco



Do Mapa apresentado na Figura 46, verifica-se que o estado é provido de rodovias estaduais e federais. Conforme apresentado no tópico 3.2.2.1 (Infraestrutura de Transporte), o Estado dispõe de 2.903,30km de rodovias federais e 3.615,80km de rodovias estaduais. Entre as principais rodovias federais que cortam Pernambuco estão as rodovias longitudinais BR-101, BR-104, BR-116, BR-122, a rodovia transversal BR-232 e a rodovia de ligação BR-407.

Para avaliar a proximidade das principais rodovias de Pernambuco com a usina solar, também foram geradas as distâncias euclidianas para esse dado espacial (convertido para *raster* de 90m de resolução espacial), a partir do uso do algoritmo *Euclidean Distance* do ArcGIS 10.1. Como resultado foi gerado o Mapa da Figura 47.

Figura 47 – Mapa das Distâncias às Principais Rodovias do Estado de Pernambuco



Do Mapa da Figura 47, observa-se que distâncias máximas de 10km das principais rodovias são predominantes no Estado, abrangendo todas as suas mesorregiões. Por outro lado, as maiores distâncias às principais rodovias são localizadas, sobretudo, no Sertão e no São Francisco Pernambucano, nos municípios de Petrolina, Santa Cruz, Parnamirim, Ouricuri, Salgueiro, Carnaubeira da Penha, Granito, Floresta e Serra Talhada. Também em Itaíba, Tupanatinga e Buíque, no Agreste, são encontradas regiões com tal característica.

e) Distâncias às Linhas de Distribuição

Os requisitos para a interligação da usina solar com o sistema elétrico são semelhantes aos das outras usinas termoeletricas. É necessário dispor de linhas com capacidade de carga e ou subestações, o mais próximo possível da usina solar, uma vez que, os custos de construção de novas linhas de distribuição são, em geral, elevados e dependem do nível de voltagem da linha e de seu comprimento.

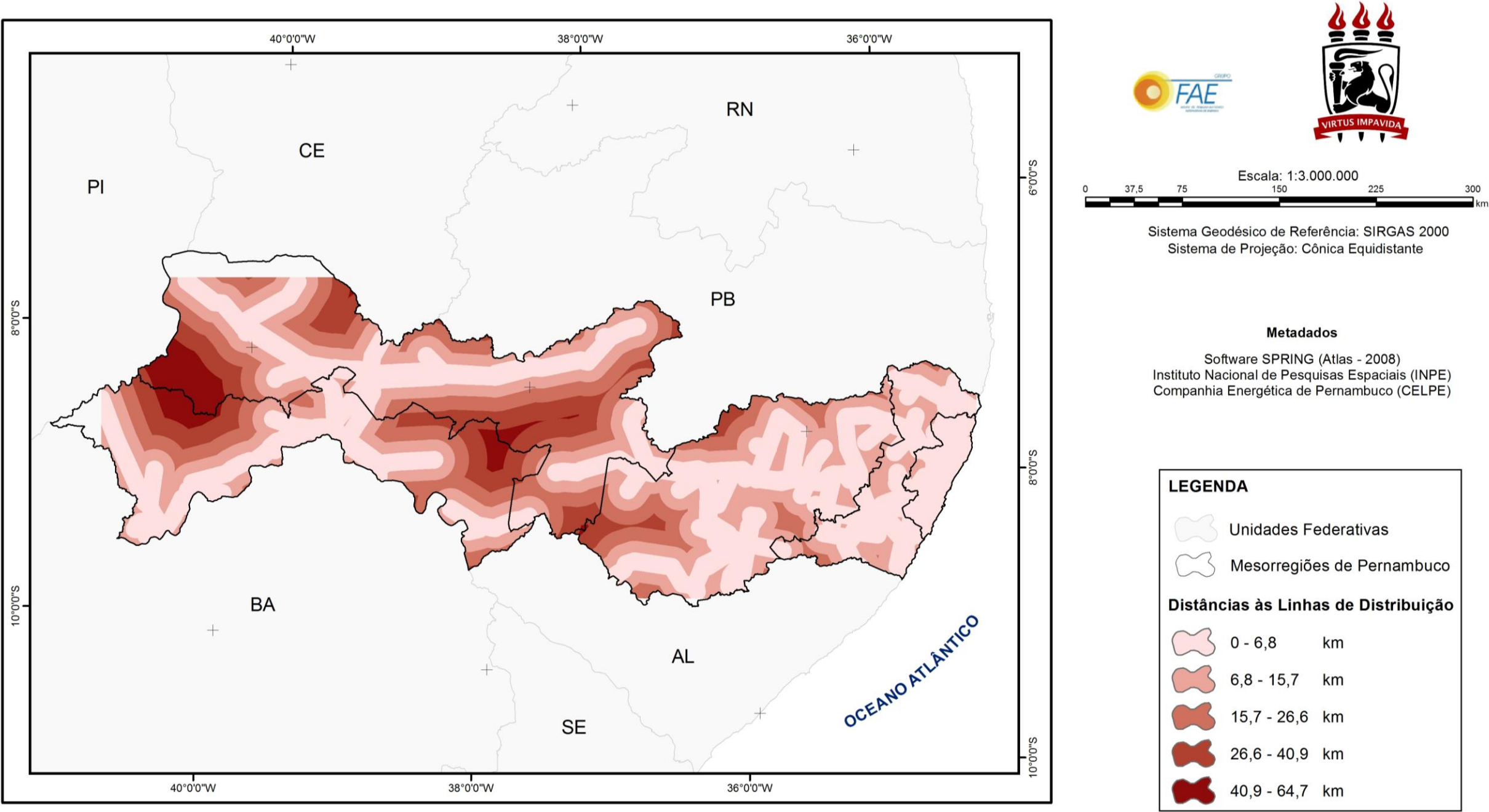
As informações espaciais acerca das linhas de distribuição em Pernambuco foram obtidas junto a CELPE. O dado original, no formato digital foi georreferenciado para, posteriormente, fazer a vetorização do plano de interesse (as linhas de distribuição). O processo de vetorização foi feito com o auxílio do *software* ArcGIS 10.1. O Mapa resultante das linhas de distribuição de Pernambuco foi mostrado na Figura 31.

Do Mapa da Figura 37, observou-se que as linhas de 69kV são as que predominam no Estado, estando presente em todas as mesorregiões. Por outro lado, as linhas de 138kV foram encontradas somente no Sertão e no São Francisco Pernambucano; e as linhas de 230kV, na parte limítrofe das mesorregiões Metropolitana do Recife e Mata Pernambucana.

Na parte central do estado de Pernambuco, onde estão situados os municípios Floresta e Betânia, foi verificado que existe um vazio de informações acerca das linhas de distribuição. Outra região com características similares é o extremo Oeste do Estado, no limite das mesorregiões do Sertão e São Francisco Pernambucano, onde estão localizados os municípios de Santa Filomena, Dormentes, Santa Cruz e Lagoa Grande.

De modo análogo aos *layers* de recursos hídricos e principais rodovias, também foram geradas distâncias euclidianas para as linhas de distribuição visando à análise da proximidade com a usina solar. Para isto, os dados das linhas de distribuição foram convertidos para *raster* de 90m de resolução espacial, para uso no algoritmo *Euclidean Distance* do ArcGIS 10.1. O Mapa resultante dessa determinação está mostrado na Figura 48.

Figura 48 – Mapa das Distâncias às Linhas de Distribuição do Estado de Pernambuco



Do Mapa da Figura 48, se verifica que distâncias máximas de 7km das linhas de distribuição são visíveis no Estado em todas as suas mesorregiões. Já as maiores distâncias às linhas de distribuição estão naqueles locais onde há ausência de tais linhas, especialmente em Santa Filomena, Dormentes, Santa Cruz e Lagoa Grande, localizadas no extremo Oeste do Estado, na região limítrofe entre o Sertão e o São Francisco Pernambucano. Também na parte central do Estado onde estão localizados os municípios Floresta e Betânia.

f) Distância às Áreas Urbanas e de Expansão Urbana

As áreas urbanas são as regiões do município caracterizadas pela edificação contínua e a existência de equipamentos sociais destinados às funções urbanas básicas, como habitação, trabalho, recreação e circulação. De acordo com o § 1º do art. 32 do Código Tributário Nacional (CTN) essas áreas são definidas em lei municipal e devem atender ao requisito mínimo de melhoramentos em pelo menos dois dos seguintes elementos: a) Meio-fio ou calçamento, com canalização de águas pluviais; b) Abastecimento de água; c) Sistema de esgotos sanitários; d) Rede de iluminação pública, com ou sem posteamento para distribuição domiciliar; e) Escola primária ou posto de saúde a uma distância máxima de três quilômetros do imóvel considerado.

Por outro lado, as áreas de expansão urbana (ou urbanizáveis) são aquelas contíguas às áreas urbanas, geralmente dedicadas às atividades rurais e ou destinadas como reserva para a expansão urbana. Quando se observa a existência de loteamentos aprovados pelos órgãos competentes, destinados à habitação, à indústria ou ao comércio, estas áreas podem também ser consideradas como urbanas, pela lei municipal, segundo o § 2º do art. 32 do CTN.

Tanto as áreas urbanas quanto as áreas de expansão urbana devem ser preservadas com vistas a atender à sua função social. Por isto, estas regiões devem ser consideradas como inapropriadas para a instalação da usina solar (excluídas do modelo) e, além disto, ser avaliadas quanto a sua proximidade com a usina solar. Com relação a este último quesito, ARÁN CARRIÓN et al., (2008), por exemplo, realizaram análises de proximidade de áreas urbanas com usinas solares fotovoltaicas em função de seu número de habitantes: para as regiões com população maior que 5.000 habitantes o limiar adotado para as distâncias das áreas urbanas foi de 5km, enquanto que, para as regiões com população menor que 5.000 habitantes, o limiar adotado foi de 1km.

Nesta pesquisa, a determinação das áreas urbanas e de expansão urbana foi feita para todos os municípios de Pernambuco com população maior que 25.000 habitantes, a partir do uso das imagens do satélite LANDSAT 8, que são disponibilizadas pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (*U.S. Geological Survey* – USGS) na resolução espacial de 30m. Para a determinação, fez-se primeiramente a seleção dos municípios pernambucanos que atendiam ao critério populacional definido usando a Estimativa Populacional de 2014 do IBGE (Anexo C) e, na sequência, foram feitos os *downloads* das imagens que recobriam os municípios selecionados, no período de janeiro a dezembro de 2013, no sítio do USGS.

No *software* ArcGIS 10.1 as imagens foram georreferenciadas ao SGR SIRGAS2000 e, em seguida, foram vetorizadas as áreas de interesse. Neste processo, algumas técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI) foram aplicadas a fim de facilitar a identificação das áreas. Uma delas foi o Realce por Equalização do Histograma, que permite a redução do contraste em áreas muito claras ou muito escuras da imagem, facilitando assim, o processo de análise visual. Uma dificuldade encontrada nesta etapa do trabalho foi a identificação das áreas de interesse na região litorânea do estado em virtude da grande presença de nuvens, na época de aquisição das imagens.

A distribuição espacial das áreas urbanas e de expansão urbana de Pernambuco está mostrada no Mapa da Figura 49. Já no Mapa da Figura 50 estão representadas as distâncias euclidianas para esses dados espaciais. Tais distâncias foram obtidas com 90m de resolução espacial, a partir do uso do algoritmo *Euclidean Distance* do ArcGIS 10.1.

Figura 49 – Mapa das Áreas Urbanas e de Expansão Urbana do Estado de Pernambuco

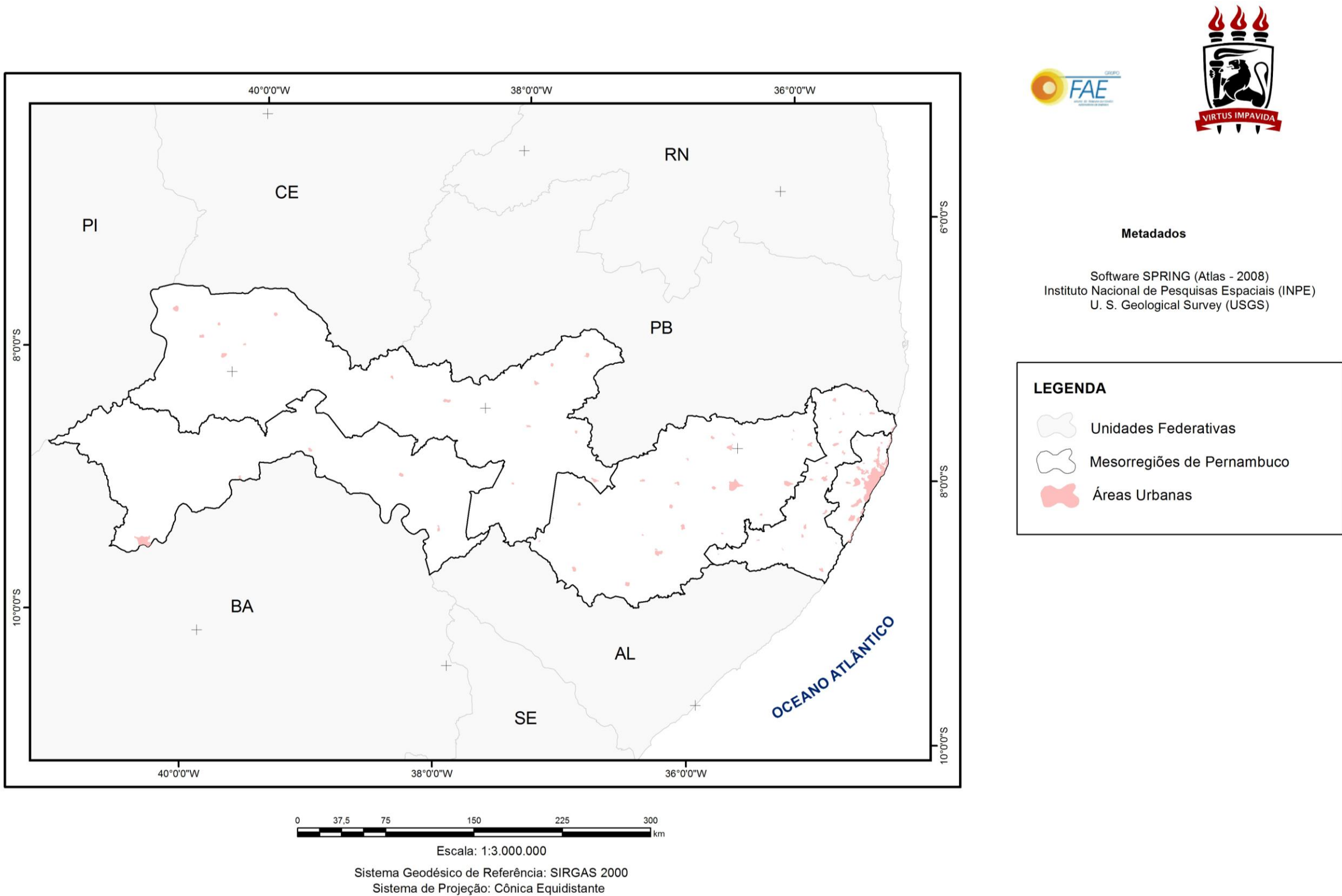
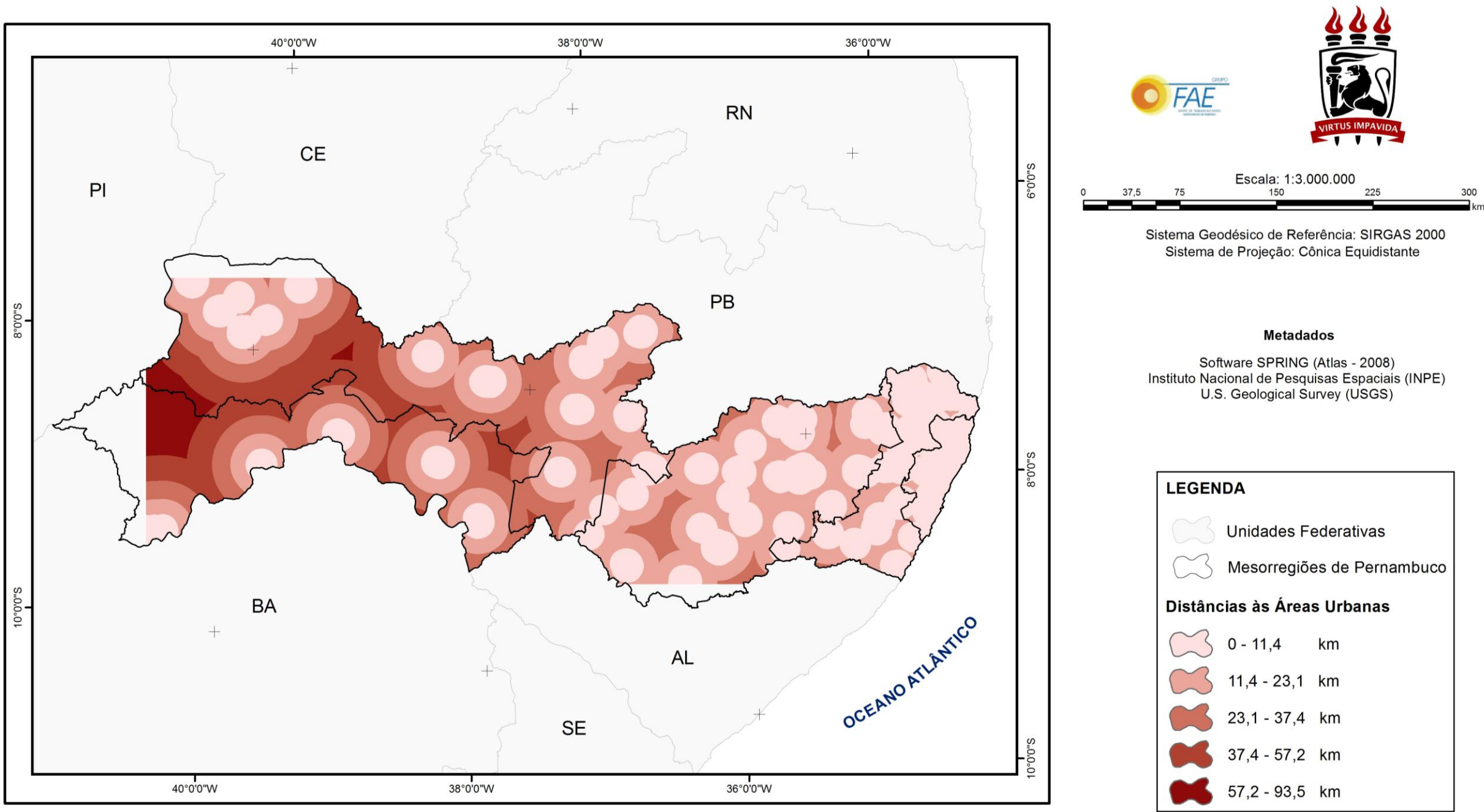


Figura 50 – Mapa das Distâncias às Áreas Urbanas do Estado de Pernambuco



Do Mapa da Figura 49 é possível observar que, em todas as mesorregiões do Estado de Pernambuco existem áreas urbanas e de expansão urbana com população acima de 25.000 habitantes, sobretudo na mesorregião Metropolitana do Recife. Por outro lado, a mesorregião do São Francisco Pernambucano é a mesorregião que tem o menor número de áreas urbanas e de expansão que atendem ao critério populacional definido.

Observando o Mapa da Figura 50, verifica-se que as maiores distâncias das áreas urbanas e de expansão urbana (acima de 57km) são localizadas no extremo Oeste do Estado, onde estão os municípios de Santa Filomena, Santa Cruz, Dormentes e Petrolina. Também em Serrita, no Sertão Pernambucano, são encontradas regiões com estas características. Por outro lado, as menores distâncias às áreas urbanas e de expansão (0 a 11,4km) são encontradas em todas as mesorregiões do Estado, com destaque para a mesorregião Metropolitana do Recife.

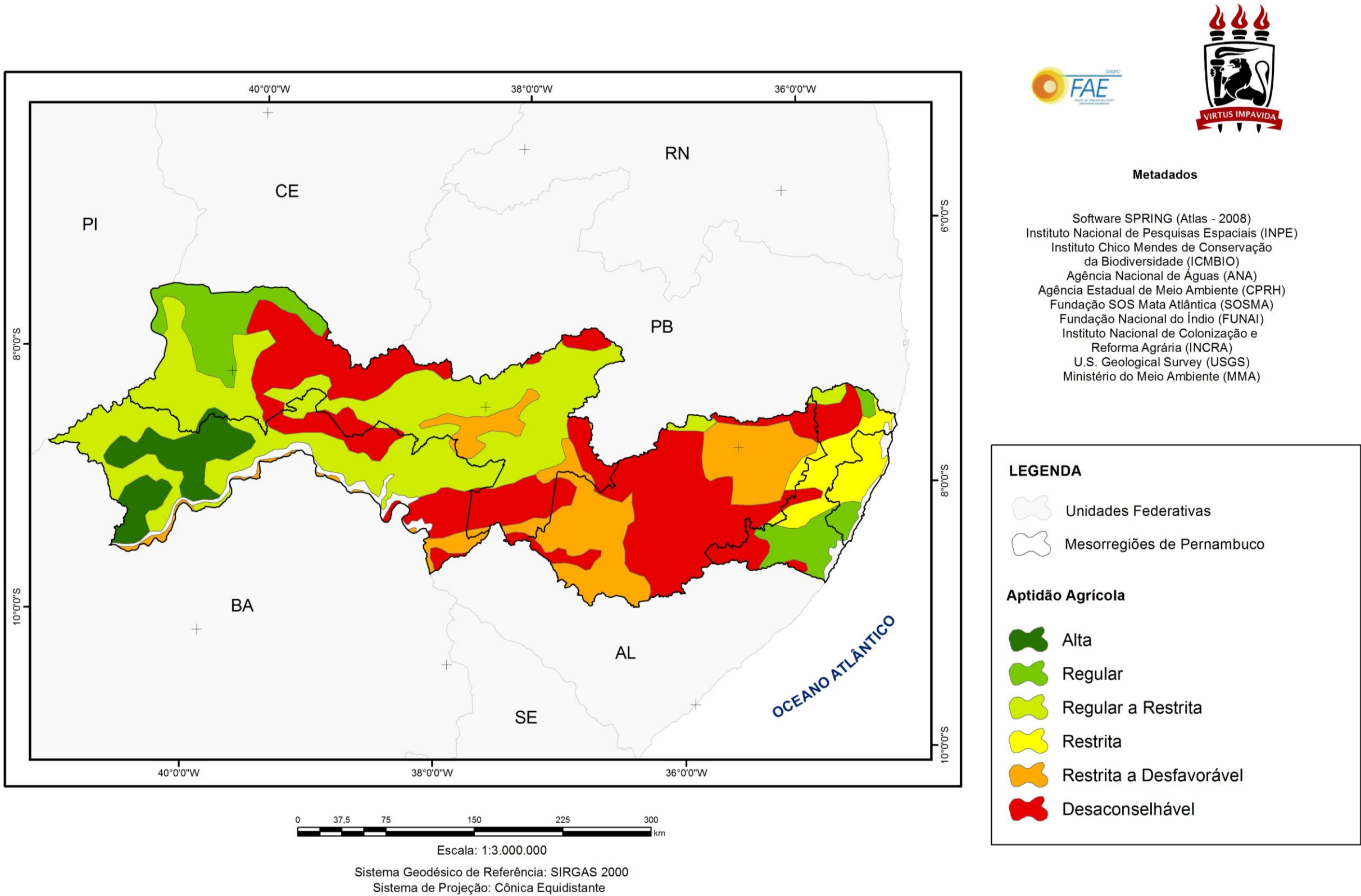
g) Uso e Ocupação do Solo

Nos estudos de localização de usina solar termoelétrica devem ser analisados tanto os aspectos positivos do uso do solo quanto os aspectos negativos ou restrições.

Os **aspectos positivos** estão relacionados àquelas áreas cuja atividade e ou ocupação é admissível, salvo em circunstâncias específicas. Nesta pesquisa, considerou-se que as áreas não utilizadas para fins produtivos são as mais indicadas para a instalação das usinas solares. Para BROESAMLE et al., (2001) regiões típicas para a instalação das usinas são as regiões áridas como os desertos.

A aptidão agrícola dos solos em Pernambuco está mostrada no Mapa da Figura 51 (Mapa de Aptidão Agrícola do Estado de Pernambuco). Nele, as áreas são classificadas em seis grupos de aptidão: alta, regular, regular a restrita, restrita, restrita a desfavorável e desaconselhável. Todas elas, exceto a primeira (alta aptidão), foram consideradas como aspecto positivo no modelo. Os dados espaciais de aptidão agrícola dos solos foram obtidos no Ministério do Meio Ambiente (MMA).

Figura 51 – Mapa de Aptidão Agrícola do Estado de Pernambuco



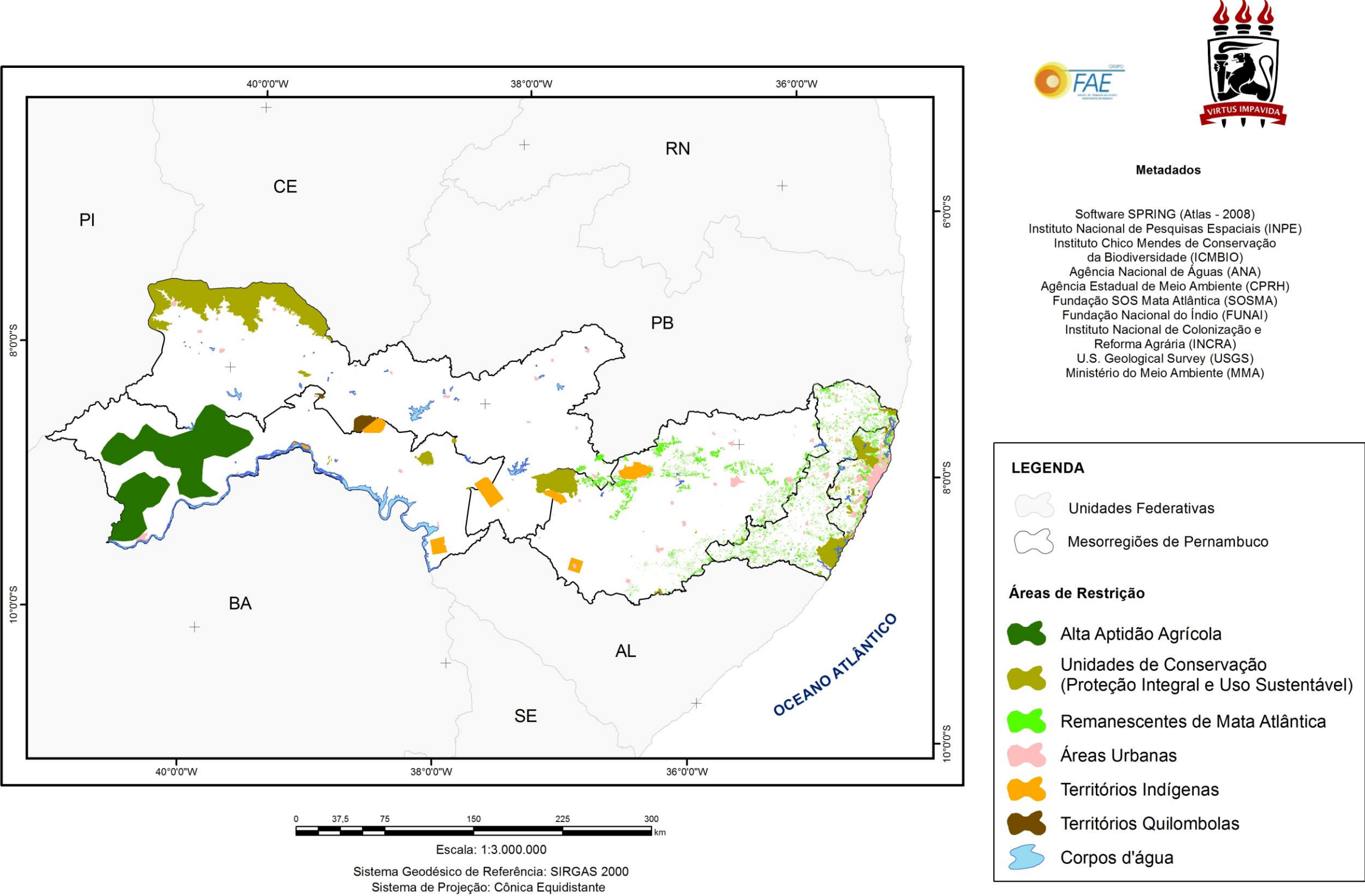
Do mapa da Figura 51, verifica-se que o estado dispõe de muitas áreas de aptidão desaconselhável, principalmente nas mesorregiões do Agreste, Sertão e São Francisco Pernambucano. Também na mesorregião da Mata Pernambucana são encontradas regiões com esta característica de aptidão, como, por exemplo, nos municípios de Vicência, Aliança, Condado e Buenos Aires (Mata Norte) e Amaraji e Primavera, na Mata Sul.

Regiões com aptidão agrícola regular e regular a restrita são encontradas nas mesorregiões do Sertão e do São Francisco Pernambucano e, em porções menores no Agreste Pernambucano, na Mata e na mesorregião Metropolitana do Recife. Áreas com aptidão restrita e restrita a desfavorável são encontradas, sobretudo, no Agreste Pernambucano.

Por outro lado, as áreas de alta aptidão agrícola estão localizadas na mesorregião do São Francisco Pernambucano, sobretudo na microrregião de Petrolina, onde estão localizados os municípios de Petrolina, Lagoa Grande e Santa Maria da Boa Vista. Estes municípios junto ao município pernambucano de Orocó e aos municípios baianos de Casa Nova, Curacá, Juazeiro e Sobradinho, formam a Região Integrada de Desenvolvimento (RIDE) instituída pela Lei Complementar nº 113 de 19 de setembro de 2001, que se destaca por sua economia dinâmica devido a fruticultura irrigada, a vitivinicultura, exportação de uva, manga e vinhos finos, a caprinovinocultura, o comércio, os serviços, a logística, a cultura, o artesanato e a gastronomia.

As **restrições**, por sua vez, estão relacionadas àquelas áreas cuja atividade ou ocupação deve ser preservada e controlada. Neste estudo, os ambientes incorporados como restrições foram os seguintes: as Unidades de Conservação de Uso Sustentável e de Proteção Integral, em âmbito federal e estadual; os Remanescentes Florestais da Mata Atlântica; os Territórios Indígenas; os Territórios Quilombolas; as Áreas de Alta Aptidão Agrícola; as Áreas Urbanas e de Expansão Urbana dos municípios com população maior que 25.000 habitantes; e os Corpos d'Água, tal como ilustra a Figura 52.

Figura 52 – Mapa das Áreas de Restrição do Estado de Pernambuco



No Mapa da Figura 52 estão representadas todas as restrições consideradas no estudo. Reunidas, essas áreas totalizam 26.554,78km² do território pernambucano e compreendem:

- Unidades de Conservação

Segundo a CPRH as Unidades de Conservação (UC) representam um dos principais instrumentos para a conservação e manejo da biodiversidade. São áreas que contêm os recursos naturais e as águas jurisdicionais, instituídas legalmente pelo Poder Público, para fins de conservação e limites definidos.

As UC são divididas em: Unidades de Proteção Integral e de Uso Sustentável. As Unidades de Proteção Integral são aquelas que mantêm livres os ecossistemas das alterações causadas pela interferência humana, admitindo apenas o uso indireto. Já as de Uso Sustentável permitem o uso de parcela de seus recursos naturais de maneira a garantir a perenidade dos recursos renováveis e dos processos ecológicos.

No Brasil, o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) é a autarquia responsável pela execução de ações do Sistema Nacional de Unidades de Conservação, podendo propor, implantar, gerir, proteger e fiscalizar as UC instituídas pela União. Cabe ainda ao ICMBio, fomentar e executar programas de pesquisa, preservação e conservação da biodiversidade e exercer o poder de polícia ambiental nas UC federais.

No âmbito estadual, a CPRH é o órgão responsável pela administração e gestão ambiental das Unidades de Conservação de Pernambuco. Entre suas principais atribuições estão o subsídio técnico de propostas de criação de UC, a elaboração de planos de manejos e a organização do cadastro estadual das UC.

Pernambuco possui hoje 90 Unidades de Conservação, espalhadas pelo Estado, que devem ser preservadas e ter seu uso controlado. Em virtude disso, foram excluídas do modelo.

Das 90 Unidades de Conservação do Estado, 45 Unidades são de Proteção Integral e 45 de Uso Sustentável. Entre as Unidades de Proteção Integral estão: 31 Refúgios de Vida Silvestre (REVIS), 5 Parques Estaduais (PE), 3 Reservas Biológicas (REBIO) 3 Estações Ecológicas (ESEC), 2 Parques Nacionais (PARNA) e 1 Monumento Natural (MN). Já entre as Unidades de Uso Sustentável estão: 21 Áreas de Proteção Ambiental (APA), 13 Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPNN), 8 Reservas de Floresta Urbana (FURB), 1 Área de Relevante Interesse Ecológico (ARIE), 1 Floresta Nacional (FLONA) e 1 Reserva Extrativista (RESEX).

- Remanescentes Florestais de Mata Atlântica

A Mata Atlântica é composta por um mosaico de vegetações definidas como florestas ombrófilas, florestas estacionais, campos de altitude, mangues e restingas.

A Mata Atlântica e seus ecossistemas associados possuíam, na década de 90, menos de 8% de sua formação original, segundo levantamento feito pela Fundação SOS Mata Atlântica (SOSMA). Além de revelar a pressão humana sobre os remanescentes florestais e como se dá o processo de desmatamento, os dados apontaram a elevada fragilidade da Mata Atlântica, com fragmentos isolados e ameaçados pela perda de biodiversidade. Com o intuito de preservar esse remanescente florestal tão importante, as áreas ocupadas pela Mata Atlântica foram também excluídas do modelo.

Em Pernambuco, os Remanescentes Florestais de Mata Atlântica ocupam uma área de 245.200,60ha, aproximadamente, de acordo com os dados da Fundação SOSMA. A maior parte desses remanescentes está localizada nas mesorregiões Metropolitana do Recife, Mata Pernambucana e Agreste Pernambucano. Vestígios dessa vegetação nativa podem também ser encontrados no Sertão do Estado, sobretudo nos municípios de Arcoverde e Sertânia.

- Territórios Indígenas

Segundo a FUNAI (Fundação Nacional do Índio), o território indígena é uma porção do território nacional, de propriedade da União, habitada por um ou mais povos indígenas, por eles utilizado, para suas atividades produtivas, imprescindível à preservação dos recursos ambientais necessários a seu bem estar e à sua reprodução física e cultural, segundo seus usos, costumes e tradições. Trata-se de um tipo específico de posse, de natureza originária e coletiva, que foi considerada também como restrição no estudo.

No território pernambucano existem atualmente nove territórios indígenas segundo a Agência Estadual CONDEPE/FIDEM. Esses territórios estão localizados nas mesorregiões do Agreste, Sertão e São Francisco Pernambucano. Seus grupos étnicos estão divididos em: Arará, Atikum, Fulni-ô, Kambiwá Pipipan, Kaapor, Kapínawa, Pankará, Pankaru, Pankararu, Truká, Tumbalala, Turiwara e Xukuru. O número total de famílias cadastradas em 2010 foi de 11.994, com população total de 44.313 habitantes. Desse total, 22.314 habitantes eram representados por mulheres e 21.999 por homens.

- Territórios Quilombolas

As comunidades Quilombolas são grupos étnicos – predominantemente constituídos pela população negra, rural ou urbana, – que se autodefinem a partir das relações com a terra, o parentesco, o território, a ancestralidade, as tradições e práticas culturais próprias. Segundo o INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária), estima-se que em todo o País existam mais de três mil comunidades quilombolas.

Tal como os territórios indígenas, as comunidades quilombolas também foram excluídas no modelo. De acordo com dados do INCRA, em Pernambuco existem, hoje, duas comunidades quilombolas, Contendas e Salgueiro, que estão localizadas nos municípios de Salgueiro e Terra Nova, nas mesorregiões do Sertão e do São Francisco Pernambucano.

- Área de Alta Aptidão Agrícola

Áreas de Alta Aptidão Agrícola representam regiões onde poderão ocorrer disputas pelo uso da terra e, por isso, foram consideradas como inapropriadas para a implantação da usina solar. Em Pernambuco, essas áreas estão localizadas no extremo Oeste no Estado, abrangendo, principalmente, os municípios de Petrolina, Santa Maria da Boa Vista e Lagoa Grande.

- Áreas Urbanas e de Expansão Urbana

As áreas urbanas e de expansão urbana precisam também ser preservadas e, por isso, também foram consideradas como restrições no estudo. Para fins de aplicação metodológica, apenas foram consideradas as áreas urbanas e de expansão urbana dos municípios pernambucanos com população acima de 25.000 habitantes.

- Corpos d'Água

As áreas do território pernambucano ocupadas por corpos d'água permanentes foram também excluídas do modelo por serem áreas inapropriadas para a instalação da usina solar. Essas áreas constituem os rios, lagos, lagoas, açudes, reservatórios localizados no estado.

Pernambuco possui uma relativa escassez de corpos d'água, sobretudo nas mesorregiões do Agreste e da Mata Pernambucana. O principal corpo d'água do Estado é o rio São Francisco, localizado na mesorregião do São Francisco Pernambucano. Outros corpos d'água de destaque são a Represa de Serrinha e o açude Poço da Cruz, ambas localizadas no Sertão Pernambucano, a represa de Itaparica, localizada no São Francisco Pernambucano e as represas de Tapacurá e Gurjaú, localizadas na mesorregião Metropolitana do Recife.

Além da consideração dos aspectos positivos e dos negativos (restrições) na utilização do solo para a localização das usinas solares, se faz necessário pensar também nas **permissões** que incidem sobre o mesmo. De acordo com DAHLE et al., (2008) os gestores de projetos CSP deverão definir junto ao(s) proprietário(s) da terra a natureza da relação contratual a ser estabelecida para seu uso. Nela, deverão estar inclusos termos de concessões para a avaliação do recurso solar, bem como, para o desenvolvimento de todas as atividades relacionadas à instalação dos projetos CSP (construção, operação e manutenção do sistema). Questões como o tempo de vida útil do projeto, os direitos de transmissão da energia gerada e os termos de compensação acerca do uso da terra (tarifa fixa de arrendamento por hectare ou tarifa fixa por kWh gerado, por exemplo) deverão também ser analisadas.

Nesta pesquisa, as relações contratuais estabelecidas entre o(s) proprietário(s) de terra e os gestores dos projetos para a utilização do solo com vistas à instalação de projetos CSP, não foram incorporadas. Isto porque estas relações somente são estabelecidas após a tomada de decisão acerca da área onde será implantada a usina solar e podem ser definidas de modo muito específico. Contudo, ressalta-se a importância de sua consideração na fase de instalação de usinas solares.

3.3.1.5 Definição da Regra de Decisão e Cálculo da Consistência do Modelo

Para atingir o objetivo deste método, definido no item 3.3.1.2, uma regra de decisão foi estabelecida para cada um dos **três cenários** gerados no estudo. A partir da definição da regra, foi possível indicar pesos para os critérios e subcritérios do problema.

Os cenários gerados para a avaliação do problema da localização da usina solar em Pernambuco são:

Cenário 1:

No primeiro cenário, o critério **Climático** foi considerado como mais importante para a regra de decisão uma vez que define a produção de eletricidade gerada na usina solar. Na sequência, foi definido o critério **Topográfico** em ordem de importância. Este critério leva em consideração os aspectos relativos à preparação do terreno para a instalação da usina solar.

O terceiro critério compreendeu o critério **Ambiental** que considera a aptidão da área para a inserção das usinas solares. Por fim, o critério **Localização** foi considerado. Nele, foram levadas em consideração as interligações rodoviária, hídrica e elétrica da usina solar, bem como, a questão da proximidade com as áreas urbanas e de expansão urbana.

Uma vez estabelecida a regra de decisão para o primeiro cenário, fez-se a comparação pareada entre os pares de critérios utilizando a Escala Fundamental de Saaty (Tabela 06), a fim de estabelecer pesos para os mesmos. A matriz de comparação de critérios gerada a partir deste processo está apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 – Matriz de Comparação dos Critérios para o Cenário 1.

Critérios	Ambiental	Topográfico	Localização	Climático
Ambiental	1,00	0,50	2,00	0,33
Topográfico	2,00	1,00	4,00	0,50
Localização	0,50	0,25	1,00	0,25
Climático	3,00	2,00	4,00	1,00
<i>Soma</i>	<i>6,50</i>	<i>3,75</i>	<i>11,00</i>	<i>2,08</i>

Observando a Tabela 11, é possível perceber que a matriz de comparação de critérios preservou a regra de decisão estabelecida, uma vez que, manteve o critério Climático como mais importante, frente aos critérios Topográfico, Ambiental e de Localização.

Após a definição da matriz de comparação de critérios fez-se a normalização dos seus elementos, a partir do método da Média das Colunas Normalizadas, para estimar os vetores das prioridades (w_j). Tais valores w_j estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Matriz Auxiliar para a Obtenção dos Pesos dos Critérios – Cenário 1.

Critérios	Ambiental	Topográfico	Localização	Climático	Vetor Prioridade (w_j)
Ambiental	0,1538	0,1333	0,1818	0,1600	0,1572
Topográfico	0,3076	0,2667	0,3636	0,2400	0,2944
Localização	0,0769	0,0667	0,0909	0,1200	0,0886
Climático	0,4615	0,533	0,3636	0,4800	0,4597

Da Tabela 12, verifica-se que o critério Climático apresentou maior peso (46%) com relação aos critérios Topográfico (29%), Ambiental (16%) e de Localização (9%).

Uma vez obtidos os vetores das prioridades para os critérios, fez-se a avaliação da consistência do modelo para verificar a transitividade dos valores julgados. O cálculo da Razão de Consistência (RC) foi feito a partir do uso das Equações 27 e 28, bem como, do valor empírico do Índice de Consistência randômico equivalente ao $n=4$ (ordem da matriz), mostrado na Tabela 07. Os valores encontrados para o maior autovalor, o índice de consistência dos julgamentos e a razão de consistência foram, respectivamente, $\lambda_{\max} = 4,045870784$, $IC = 0,015290261$ e $RC = 0,016989179$. Como o valor do RC foi menor que 0,10 (solicitação do modelo), os valores estimados para os critérios foram afirmados como consistentes.

Com todos os critérios organizados hierarquicamente, todo o processo de obtenção do vetor das prioridades e avaliação da transitividade dos valores julgados foi reproduzido para os subcritérios para determinação das ponderações finais. Tais ponderações finais bem como os valores do $\lambda_{\max}$, IC e RC calculados para os subcritérios no Cenário 1 estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Pesos Finais e Valores de $\lambda_{\max}$, IC e RC para os Subcritérios – Cenário 1.

Subcritério (Pesos)	$\lambda_{\max}$	IC	RC
Radiação Solar (42%)			
Declividade (26%)			
Uso do Solo (18%)			
Dist. Linhas Distribuição (5%)	7,125238948	0,020873158	0,015812998
Dist. Recursos Hídricos (4%)			
Dist. Rodovias (3%)			
Dist. Áreas Urbanas (2%)			

Como o valor do RC foi menor que 0,10 (Tabela 13), os valores julgados para os subcritérios também foram afirmados como consistentes.

Cenário 2:

No segundo cenário, o critério **Climático** foi considerado como o mais importante na regra de decisão. Na sequência, em ordem de importância, foram definidos os critérios **Localização**, **Topográfico** e **Ambiental**. A matriz de comparação de critérios gerada a partir desta regra de decisão e da Escala Fundamental de Saaty está mostrada na Tabela 14.

Tabela 14 – Matriz de Comparação dos Critérios para o Cenário 2.

Critérios	Ambiental	Topográfico	Localização	Climático
Ambiental	1,00	0,33	0,25	0,20
Topográfico	3,00	1,00	0,33	0,33
Localização	4,00	3,00	1,00	0,50
Climático	5,00	3,00	3,00	1,00
<i>Soma</i>	<i>13,00</i>	<i>7,33</i>	<i>3,58</i>	<i>2,03</i>

Após a definição da matriz de comparação de critérios fez-se a normalização dos seus elementos, também pelo método da Média das Colunas Normalizadas, para estimar os vetores das prioridades (w_j) que estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Matriz Auxiliar para a Obtenção dos Pesos dos Critérios – Cenário 2.

Critérios	Ambiental	Topográfico	Localização	Climático	Vetor Prioridade (w_j)
Ambiental	0,0769	0,0454	0,0069	0,0983	0,0720
Topográfico	0,2307	0,1363	0,0930	0,1639	0,1560
Localização	0,3076	0,4090	0,2790	0,2459	0,3104
Climático	0,3846	0,4091	0,5581	0,4918	0,4618

Analisando a Tabela 15, verifica-se que o critério Climático apresentou maior peso (46%) quando comparado com os demais critérios: Localização (31%), Topográfico (16%) e Ambiental (7%).

Também para os valores julgados da Tabela 15, foi feita a avaliação da consistência para analisar a transitividade. Os valores encontrados para o maior autovalor, o índice de consistência dos julgamentos e a razão de consistência foram, respectivamente, $\lambda_{\max} = 4,108684635$, IC = 0,036228212 e RC = 0,040253569. Como o valor do RC foi menor que 0,10, os valores estimados para os critérios foram afirmados como consistentes.

Uma vez que os critérios do segundo cenário estavam organizados hierarquicamente, foi repetido todo o processo para a obtenção dos vetores das prioridades para os subcritérios. As ponderações finais para os subcritérios, bem como, os valores do $\lambda_{\max}$, IC e RC estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Pesos Finais e Valores de $\lambda_{\max}$, IC e RC para os Subcritérios – Cenário 2.

Subcritério (Pesos)	$\lambda_{\max}$	IC	RC
Radiação Solar (47%)			
Dist. Linhas Distribuição (14%)			
Dist. Recursos Hídricos (13%)			
Dist. Rodovias (10%)	7,210566313	0,035009438	0,026586656
Dist. Áreas Urbanas (9%)			
Declividade (4%)			
Uso do Solo (3%)			

Como o valor do RC foi menor que 0,10 (Tabela 16) os valores estimados para os subcritérios também foram afirmados como consistentes.

Cenário 3:

Para o terceiro cenário, o critério **Ambiental** foi considerado como o mais importante na regra de decisão. Na sequência, em ordem de importância, foram definidos os critérios **Climático**, **Topográfico** e **Localização**. A matriz de comparação de critérios gerada a partir desta regra de decisão e da Escala de Saaty está mostrada na Tabela 17.

Tabela 17 – Matriz de Comparação dos Critérios para o Cenário 3.

Critérios	Ambiental	Topográfico	Localização	Climático
Ambiental	1,00	3,00	4,00	2,00
Topográfico	0,33	1,00	3,0	0,50
Localização	0,25	0,33	1,00	0,33
Climático	0,50	2,00	3,00	1,00
<i>Soma</i>	<i>2,08</i>	<i>6,33</i>	<i>11,00</i>	<i>3,83</i>

Após a definição da matriz de comparação de critérios fez-se a normalização dos seus elementos, pelo método da Média das Colunas Normalizadas, para estimar os vetores das prioridades (w_j) que são mostrados na Tabela 18.

Tabela 18 – Matriz Auxiliar para a Obtenção dos Pesos dos Critérios – Cenário 3.

Critérios	Ambiental	Topográfico	Localização	Climático	Vetor Prioridade (w_j)
Ambiental	0,4800	0,4737	0,3636	0,5217	0,4598
Topográfico	0,1602	0,1579	0,2727	0,1304	0,1803
Localização	0,1200	0,0526	0,0909	0,0870	0,0876
Climático	0,2401	0,3158	0,2727	0,2609	0,2723

Observando a Tabela 18, verifica-se que o critério Ambiental apresentou maior peso (46%) seguido dos critérios Climático (27%), Topográfico (18%) e Localização (9%).

Os valores julgados da Tabela 18 foram avaliados quanto à transitividade. Os valores encontrados para o maior autovalor, o índice de consistência e a razão de consistência foram, respectivamente, $\lambda_{\max} = 4,088439432$, $IC = 0,029479811$ e $RC = 0,032755345$. Como $RC < 0,10$, os valores estimados para os critérios foram afirmados como consistentes.

Com os critérios organizados hierarquicamente no terceiro cenário, foi repetido todo o processo para a obtenção dos vetores das prioridades para os subcritérios. Os pesos finais para os subcritérios bem como os valores do $\lambda_{\max}$, IC e RC estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Pesos Finais e Valores de $\lambda_{\max}$, IC e RC para os Subcritérios – Cenário 3.

Subcritério (Pesos)	$\lambda_{\max}$	IC	RC
Uso do Solo (40%)			
Radiação Solar (22%)			
Declividade (20%)			
Dist. Linhas Distribuição (7%)	7,056814489	0,009469081	0,007173547
Dist. Recursos Hídricos (5%)			
Dist. Rodovias (4%)			
Dist. Áreas Urbanas (2%)			

Como o valor do RC foi menor que 0,10 (Tabela 19), os valores estimados para os subcritérios também foram afirmados como consistentes.

Após a determinação das ponderações finais para os critérios e para os subcritérios, foi realizada a determinação da aptidão das áreas para a instalação no ambiente do SIG.

3.3.1.6 Aptidão das Áreas para a Inserção de Usinas Solares Termoelétricas

A primeira etapa do processo de determinação da aptidão das áreas no ambiente SIG foi a **normalização dos dados espaciais relativos aos indicadores positivos**. O processo foi feito no *software* ArcGIS 10.1 usando a função de pertinência *fuzzy sigmoidal*, pois segundo EASTMAN (1996), o uso desta função associada a um conjunto de pontos de controle, permite representar adequadamente o período em que o efeito do valor normalizado para o resultado final é mais efetivo. A apresentação dos *layers* normalizados, bem como, a descrição dos pontos de controle utilizados no processo encontra-se no Capítulo 4.

Ao contrário dos indicadores positivos que determinam superfícies contínuas para a aptidão das áreas, as restrições apresentam limites bem definidos, segmentando a classificação das áreas como apta e não apta para o fim desejado. Desta forma, as restrições apresentam formato *booleano* (natureza binária) com análise de aptidão dada por: valor um (1) quando há aptidão da área; e, em caso contrário, o valor zero (0). A **representação das restrições no formato booleano** também foi feito no ArcGIS 10.1.

Após a normalização dos indicadores positivos e representação booleana das restrições em formato *booleano*, foi feita a **combinação linear ponderada** (do inglês, *Weighted Linear Combination – WLC*) entre todos os subcritérios do estudo. Nesta técnica, os subcritérios são combinados, com seus respectivos pesos, para gerar mapas finais de aptidão.

Para MUSSONE e SALA (2001) apud ZAMBON et al., (2005) quando há indicadores positivos e restrições para serem considerados na determinação da aptidão das áreas, como é o caso da localização de usinas solares termoeletricas, a técnica WLC é dada pela Equação 30:

$$I = \sum_{i=1}^n w_i x_i \cdot \prod_{j=1}^k c_j \quad (\text{Eq. 30})$$

Onde:

I = valor final do *score*;

n = número de indicadores positivos;

w_i = peso do indicador positivo i ;

x_i = valor normalizado do indicador positivo i ;

k = número de critérios de exclusão;

c_j = *score* (0 ou 1) do critério de exclusão.

O uso da técnica WLC proporciona a compensação total entre os indicadores positivos de forma que o alto *score* de aptidão em certo *layer* numa área pode compensar uma baixa aptidão de outro *layer* nessa mesma área, (ZAMBON et al., 2005).

Neste estudo, o processo de combinação linear ponderada foi feito com o auxílio dos recursos *Weighted Overlay*, *Raster Calculator* e *ModelBuilder* do *software* ArcGIS 10.1, onde os indicadores positivos e as restrições foram relacionados, em cada cenário, para gerar mapas de aptidão das áreas no estado de Pernambuco.

3.3.1.7 Localização da Usina Solar Termoeletrica pelo Método AHP

A identificação das áreas promissoras para a inserção de usinas solares termoeletricas em Pernambuco foi feita a partir da avaliação do grau de aptidão das áreas, em cada cenário gerado. Os resultados obtidos desta avaliação estão mostrados no Capítulo 4.

3.3.1.8 Validação de Modelo

Como etapa final da construção do modelo foi feita sua validação a fim de averiguar se o sistema desenvolvido correspondia, de fato, a uma representação pertinente do mundo real. Segundo (POZZOBON, 2003 apud ARÁN CARRIÓN, 2008) existem várias técnicas de validação de sistemas baseados em SIG e ADM, como por exemplo, a validação *pixel a pixel*, a comparação e análise visual e as visitas *in loco*.

Na validação *pixel a pixel*, os *pixels* de determinado *layer* temático são selecionados no mapa resultante do modelo e também em um documento cartográfico existente (mapa temático, por exemplo) para confirmar se suas informações coincidem. Na comparação e análise visual, são analisadas as relações entre os *layers* ponderados individualmente e a aptidão final das áreas para verificar a consistência dos pesos que foram atribuídos no modelo. Por fim, na técnica de visitas *in loco*, são realizadas visitas nos locais definidos no modelo para averiguar sua aptidão, ou seja, para confirmar se suas características existentes, como mostrado nos mapas temáticos.

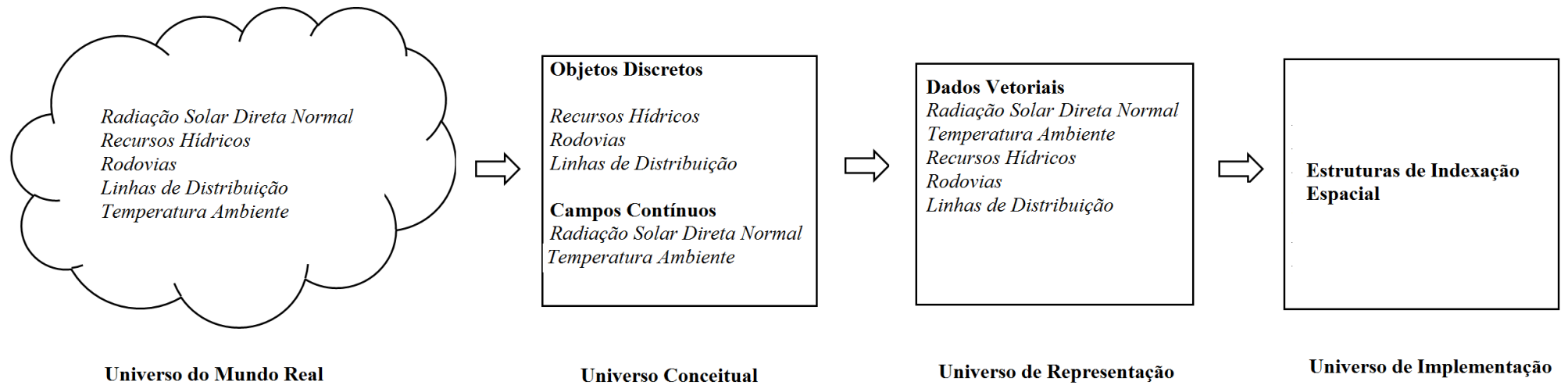
Nesta pesquisa, as técnicas de validação realizadas foram a validação *pixel a pixel* e a comparação e análise visual que estão no Capítulo 4. As visitas *in loco* não foram realizadas.

3.3.2 Metodologia da Localização pelo Custo de Produção de Eletricidade

3.3.2.1 Modelagem Conceitual de Dados Geográficos – Método do Custo de Produção de Eletricidade

O processo de abstração do mundo real para a localização pelo Método do Custo de Produção de Eletricidade está mostrado na Figura 53.

Figura 53 – Processo de Abstração do Mundo Real para o Método do Custo de Produção de Eletricidade

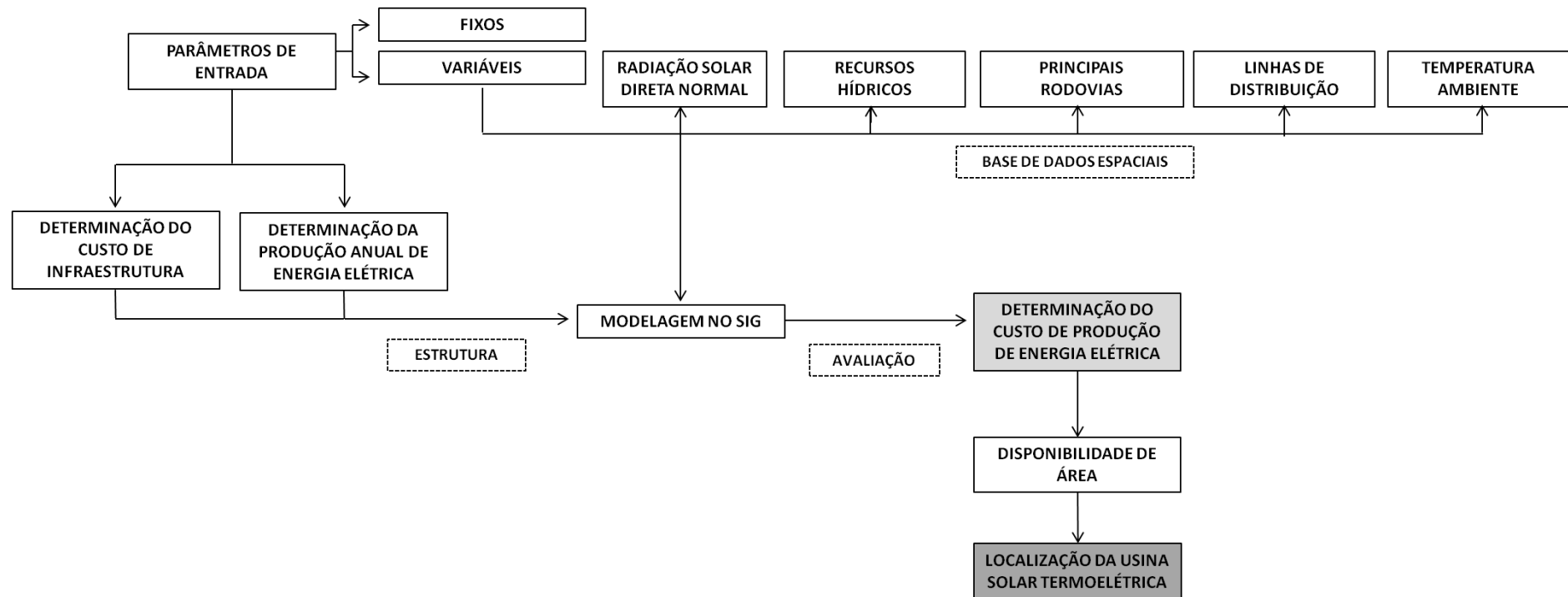


Na Figura 53 está exposto o processo de abstração do mundo real para a localização pelo uso do Método do Custo de Produção de Eletricidade, com a apresentação do **Universo do Mundo Real**, onde estão os fenômenos a serem modelados; do **Universo Conceitual**, com a representação no SIG segundo a visão de objetos discretos e campos contínuos; do **Universo de Representação**, com os modelos de dados no formato vetorial e matricial; e o **Universo de Implementação** com as estruturas de indexação espacial usadas para a construção do sistema.

3.3.2.2 Procedimentos Metodológicos Realizados para a Aplicação do Método do Custo de Produção de Eletricidade

O estudo de localização de usinas solares termoeletricas pelo método do custo teve início com a definição dos parâmetros de entrada usados no modelo e a construção da BDE. Posteriormente, foram determinados o custo total de infraestrutura da usina solar, o qual considera os gastos com as interligações elétrica, rodoviária e hídrica da usina, e a produção anual de energia elétrica. Como passos posteriores, foi feita a modelagem da Equação que define o custo de geração de eletricidade (Eq. 14) no SIG e determinado o custo de produção de energia elétrica para o estado de Pernambuco. Como etapa final do processo, foram feitas análises de disponibilidade de área e indicadas as áreas promissoras para a instalação das usinas. Cada uma dessas etapas está apresentada no fluxograma da Figura 54 e descrita detalhadamente nos tópicos 3.3.2.3 a 3.3.2.8.

Figura 54 – Procedimentos Metodológicos Realizados para a Definição das Áreas Potenciais pelo Método do Custo de Produção de Eletricidade



3.3.2.3 Definição dos Parâmetros de Entrada

Os parâmetros de entrada para a localização de usina solar termoeletrica pelo método do custo de produção de eletricidade foram caracterizados em dois grupos: a) os parâmetros fixos e b) os parâmetros variáveis.

Os **parâmetros fixos** foram constituídos pelo custo total de investimento da usina solar (I_{plant}), pela taxa de retorno do capital (i), tempo de vida útil da usina (n), custo, por quilômetro, para a interligação elétrica por meio das linhas de distribuição ($C_{\text{htg/km}}$), custo, por quilômetro, para a interligação hídrica ($C_{\text{p/km}}$), custo, por quilômetro, para a interligação rodoviária ($C_{\text{road/km}}$) e pelo custo com os trabalhadores (C_{per}). As informações de unidade e valor destes parâmetros estão apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20 – Parâmetros Fixos Usados no Método do Custo de Produção de Eletricidade

Parâmetro	Valor	Unidade
I_{plant}	720.000.000,00	R\$
i	8	%
n	25	anos
$C_{\text{htg/km}}$	1.000.000,00	R\$/km
$C_{\text{p/km}}$	120.858,00	R\$/km
$C_{\text{road/km}}$	115.000,00	R\$/km
C_{per}	7.200.000,00	R\$

Valores utilizados por pesquisadores na área da Energia Solar para a avaliação dos gastos relacionados à implantação de usinas solares termoeletricas no Brasil.

Importante realizar algumas considerações sobre os valores mostrados na Tabela 20:

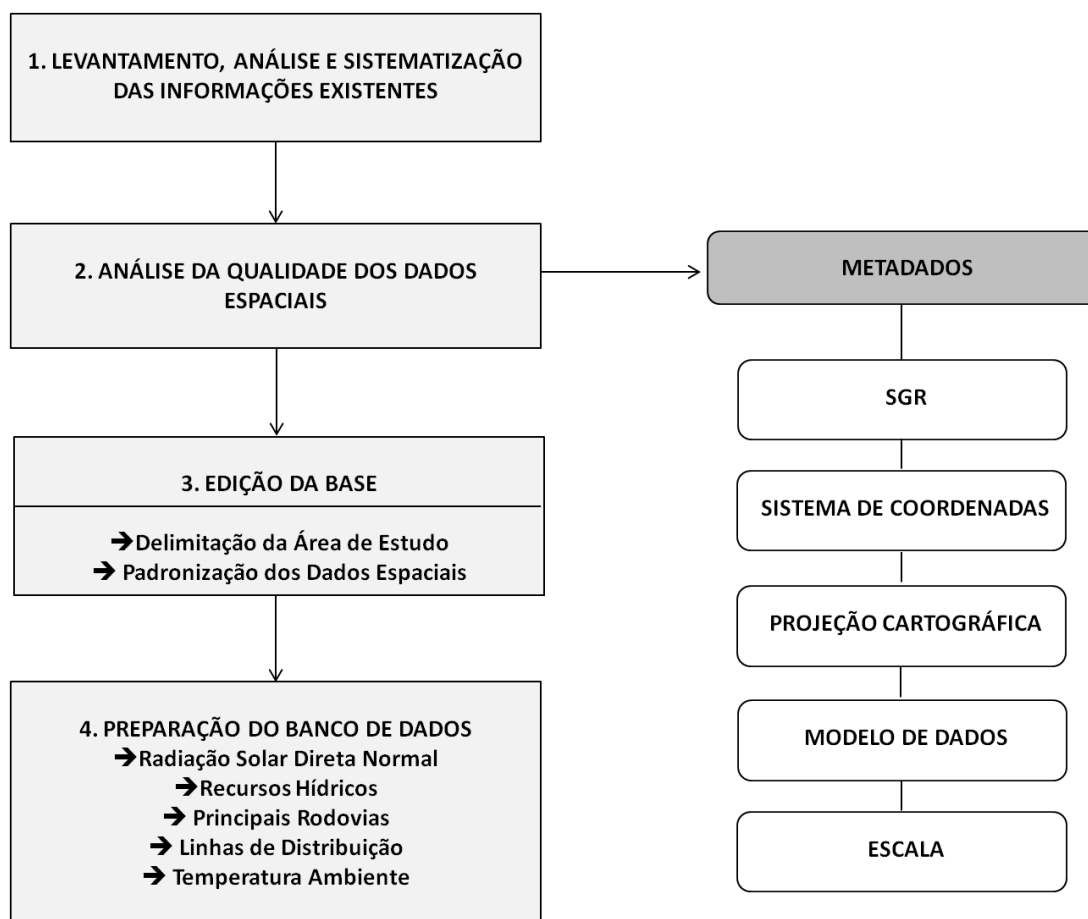
- i. O valor do custo total de investimento da usina solar (I_{plant}) representa uma estimativa de custo para a implantação de uma usina de 50MW. Este custo leva em consideração despesas como a preparação do terreno e a implantação do campo solar e do bloco de geração da usina;
- ii. O custo com os trabalhadores (C_{per}), que representa 1% do custo de investimento (I_{plant}), considera os gastos anuais totais com os trabalhadores durante as atividades de operação e manutenção do sistema;

- iii. O valor do custo, por quilômetro, para a interligação elétrica por meio das linhas de distribuição ($C_{htg/km}$) representa uma estimativa para a ligação do sistema elétrico com linhas de distribuição de 230kV.

Os **parâmetros variáveis**, por sua vez, foram constituídos pela produção anual de energia elétrica (E_{year}), custo total de infraestrutura (I_{inf}) e pelos custos associados com a operação e manutenção do sistema ($C_{O\&M}$), os quais estão relacionados aos dados espaciais de radiação solar, temperatura ambiente, distância aos recursos hídricos, distância às principais rodovias e distância às linhas de distribuição. Estes dados espaciais constituíram a BDE do estudo de localização pelo custo de produção de eletricidade.

A construção da BDE para aplicação no método do custo de produção de eletricidade seguiu os mesmos procedimentos que a definição da BDE para utilização do método AHP, englobando as ações de levantamento, análise e síntese das informações existentes, análise de qualidade nos dados espaciais, edição da base e preparação do banco de dados conforme ilustra a Figura 55.

Figura 55 – Construção da Base de Dados Espaciais para o Método do Custo de Produção de Eletricidade



Como ilustrado na Figura 55, na primeira etapa do processo de construção da BDE foram feitos o **Levantamento, Análise e Sistematização das Informações Existentes**. Após isto, fez-se a aquisição dos dados junto aos órgãos governamentais competentes.

Uma vez que, os dados foram adquiridos, foram feitas **Análises de Qualidade** nos mesmos objetivando identificar seu Georreferenciamento, Sistema de Coordenadas, Projeção Cartográfica, Modelo de Dados e Escala (análises de metadados).

Na etapa **Edição da Base**, realizada com o auxílio dos *softwares* Spring 4.2.6 e ArcGIS 10.1, foi feita a delimitação da área de estudo e também a padronização dos dados espaciais. Na padronização, os dados foram georreferenciados ao SIRGAS2000, representados no Sistema de Coordenadas Geodésico (Latitude e Longitude) e projetados no Sistema de Projeção Cônica Equidistante.

A estrutura de Dados usada neste método foram a vetorial e a matricial e a Escala utilizada também foi a de 1:3.000.000 para os Mapas em formato A3.

Na etapa final da construção da BDE, fez-se a **Preparação do Banco de Dados**, onde foram organizadas as informações dos dados espaciais utilizados neste estudo, que são:

a) Radiação Solar Direta Normal

Conforme visto anteriormente, a radiação solar direta normal é o parâmetro mais importante para a localização de usinas solares termoeletricas. No estudo de localização pelo método do custo, este parâmetro define, quantitativamente, a produção anual de eletricidade numa dada região.

A distribuição espacial da radiação solar direta normal (valor diário médio anual) em Pernambuco foi apresentada na Figura 42, onde foi observado que os índices de radiação variaram de 3,8 a 5,8 kWh/m².dia. Os valores mais altos (entre 5,4 a 5,8 kWh/m².dia) foram encontrados na parte Oriental e Norte do Sertão Pernambucano, próximo ao estado da Paraíba e, em áreas isoladas da mesorregião do São Francisco Pernambucano, sobretudo no município de Afrânio. Já os menores valores (entre 3,8 a 4,2 kWh/m².dia) predominaram na porção Leste do estado, principalmente nas mesorregiões Metropolitana do Recife e Mata Pernambucana.

b) Distância aos Recursos Hídricos

A disponibilidade hídrica, bem como, a proximidade da usina solar com os mananciais hídricos são fatores importantes na localização de sistemas solares termoeletricos que fazem uso de resfriamento úmido. No método do custo, este parâmetro está diretamente relacionado com o custo total de infraestrutura da usina solar por intermédio da Equação 15.

As distâncias para os recursos hídricos no estado de Pernambuco foram mostradas na Figura 45. Deste mapa verificou-se que as maiores distâncias aos recursos hídricos (acima de 39km) estão localizadas no Agreste Pernambucano, principalmente em Riacho das Almas, Caruaru, Bezerros, Agrestina, Itaíba e Águas Belas, e no São Francisco Pernambucano (interior dos municípios de Afrânio, Dormentes e Petrolina). Já as menores distâncias estão presentes em todas as mesorregiões do Estado.

c) Distância às Principais Rodovias

A necessidade de viabilizar acessos para a usina solar também é fator importante na sua localização. No método do custo este parâmetro também está diretamente relacionado aos gastos totais de infraestrutura da usina (Equação 15).

As informações sobre as distâncias para as principais rodovias em Pernambuco foram mostradas na Figura 47. Nele observou-se que distâncias máximas de 10km das principais rodovias são predominantes no estado, abrangendo todas as suas mesorregiões. Já as maiores distâncias encontradas (15 a 29,2km) são localizadas nas mesorregiões do Sertão, São Francisco Pernambucano e Agreste Pernambucano.

d) Distância às Linhas de Distribuição

As linhas de distribuição são necessárias para o transporte da energia gerada na usina até os centros consumidores. No método do custo, este parâmetro também está diretamente relacionado com o custo total de infraestrutura, Equação 15.

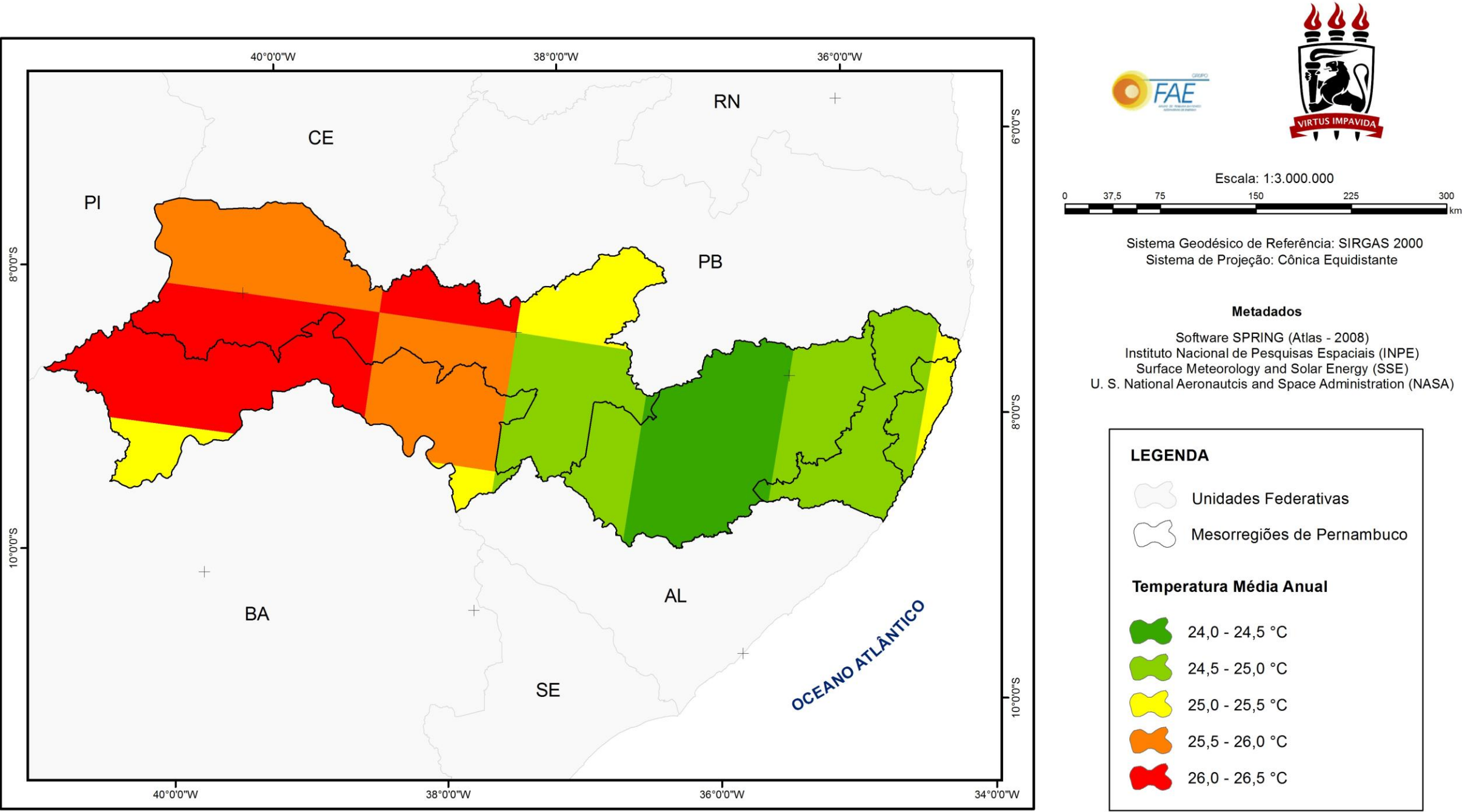
O Mapa das distâncias às linhas de distribuição de Pernambuco foi mostrado na Figura 48. Nele foi notado que distâncias máximas de 7km para as linhas são encontradas em todas as mesorregiões. Já as maiores distâncias para estas linhas estão localizadas onde há ausência de informação, sobretudo em Santa Filomena, Dormentes, Santa Cruz e Lagoa Grande no extremo Oeste do Estado e também na parte central do mesmo.

e) Temperatura Ambiente

A informação espacial da temperatura ambiente é categórica para a determinação produção anual de energia elétrica.

Em Pernambuco, a distribuição espacial da temperatura ambiente está apresentada na Figura 56. Os dados foram obtidos na Agência Espacial Americana NASA e no SSE (*Surface Meteorology and Solar Energy*) e referem-se a valores obtidos a 10m acima da superfície da Terra. Para ilustração no mapa, os dados foram organizados em cinco classes, com intervalos iguais de 0,5°C cada.

Figura 56 – Mapa da Temperatura Média Anual do Estado de Pernambuco



Na Figura 56, observa-se que, as médias anuais de temperatura em Pernambuco são maiores que 24°C. Os valores mais altos (que chegam a 26,5°C) são encontrados nas mesorregiões do Sertão e do São Francisco Pernambucano, sobretudo nos municípios de Dormentes, Afrânio, Santa Filomena, Santa Cruz, Lagoa Grande, Petrolina, Parnamirim, Santa Maria da Boa Vista, Cabrobó, Orocó, Terra Nova, Salgueiro e Belém de São Francisco, São José do Belmonte e Santa Cruz da Baixa Verde.

Em contrapartida, os valores mais baixos da temperatura (24,0°C – 24,5°C) são predominantes na região do Agreste Pernambucano e abrange vários municípios. Entre eles, estão os municípios de Pesqueira, Sanharó, Belo Jardim, Tacaimbó, São Caitano, São Bento do Una, Capoeiras, Caetés, São João, Garanhuns, Bom Conselho, Lajedo, Venturosa, Poção, Alagoinha, Pedra, Brejão, Saloá, Angelim e Canhotinho.

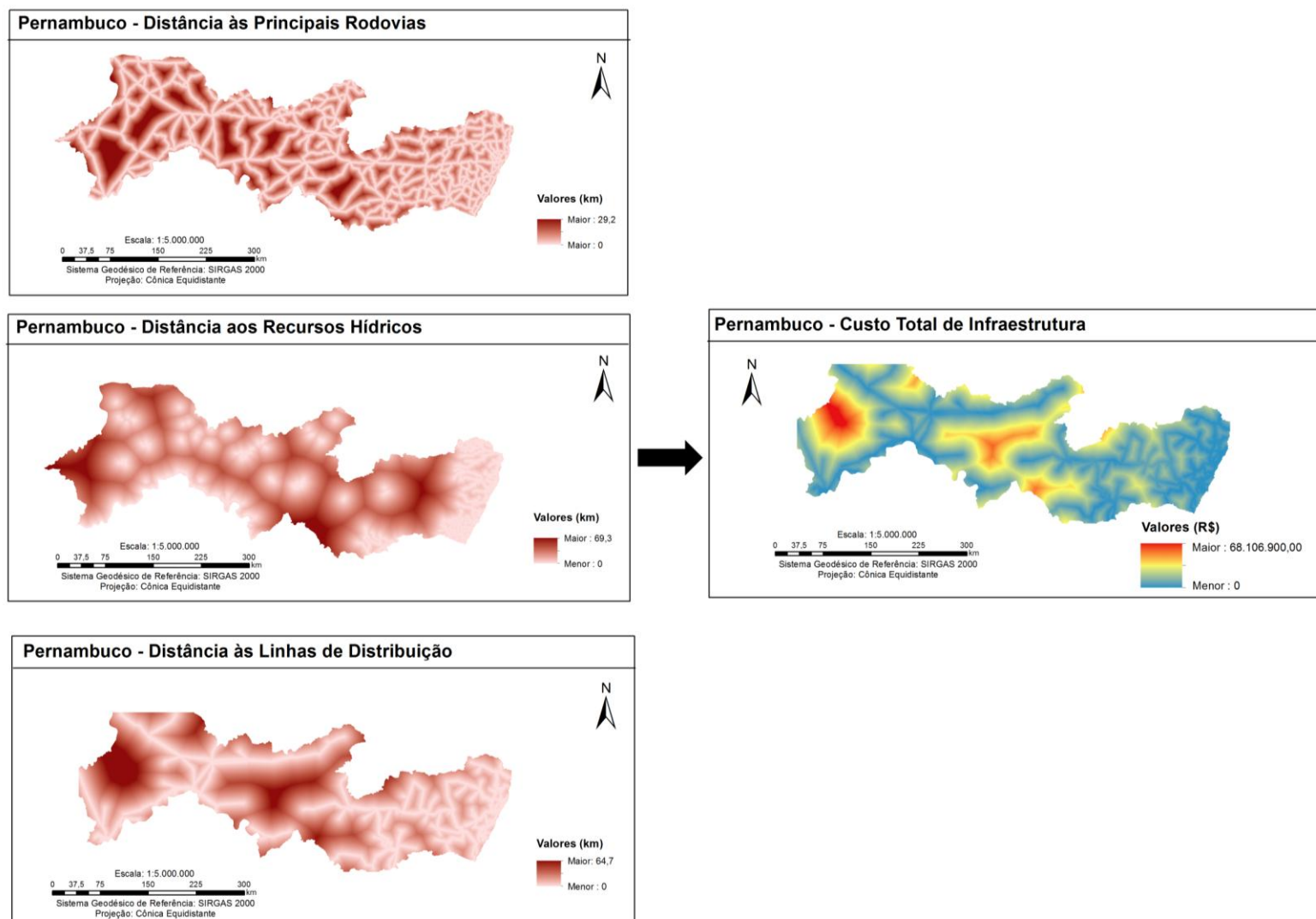
Temperaturas da ordem de 25°C são encontradas em todas as mesorregiões do Estado, sobretudo na parte central do Estado onde estão situados os municípios de Custódia, Betânia, Floresta e Sertânia, e nas mesorregiões Metropolitana do Recife e Mata Pernambucana, onde estão localizados os municípios de Carpina, Nazaré da Mata, Vicência, Aliança, Condado, Goiana, Araçoiaba, Igarassu, Abreu e Lima e Paulista, por exemplo.

3.3.2.4 Determinação do Custo Total de Infraestrutura

Para determinar o custo total de infraestrutura (I_{inf}), o qual relaciona os gastos com as interligações elétrica, hídrica e rodoviária da usina solar, foram utilizados os arquivos *raster* relativos às distâncias aos recursos hídricos, distância às principais rodovias e distâncias às linhas de distribuição como também os valores dos parâmetros $C_{htg/km}$ (custo, por quilômetro, para a interligação elétrica por meio das linhas de distribuição), $C_{p/km}$ (custo, por quilômetro, para a interligação hídrica) e $C_{road/km}$ (custo, por quilômetro, para a interligação rodoviária), mostrados na Tabela 24. Estas informações foram inseridas no recurso *Raster Calculator* no ArcGIS 10.1, respeitando a Equação 15, para a determinação do custo total de infraestrutura da usina solar.

Uma ilustração esquemática da determinação do custo total de infraestrutura da usina solar está apresentada na Figura 57.

Figura 57 – Ilustração da Determinação do Custo Total de Infraestrutura da Usina Solar.



Na Figura 57 é mostrada uma ilustração esquemática da determinação do custo total de infraestrutura da usina solar: de um lado, estão representadas as distâncias às principais rodovias, as distâncias aos recursos hídricos e as distâncias às linhas de distribuição; e do outro lado, o custo total de infraestrutura.

Uma vez determinado o custo total de infraestrutura da usina solar, fez-se o cálculo da produção anual de energia elétrica.

3.3.2.5 Determinação da Produção Anual de Energia Elétrica

Para determinar a produção anual de energia elétrica na usina solar (parâmetro E_{year}), inicialmente foi calculada a energia térmica gerada no campo solar ($\dot{Q}_{\text{field}}$), que é dada pela diferença entre a energia térmica absorvida ($\dot{Q}_{\text{inc}}$) e as perdas térmicas ($\dot{Q}_{\text{loss}}$).

A determinação da energia térmica absorvida ($\dot{Q}_{\text{inc}}$) foi realizada a partir do uso das Equações 04, 05, 06, 07 e 10 e do algoritmo SOLPOS - *Sun Positions Algorithm* (2014).

O SOLPOS é um algoritmo desenvolvido pelo NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) que determina, entre outros parâmetros, os ângulos de elevação do Sol (α_s) e azimute solar (γ_s), em função da localização e do tempo. Esses ângulos são imprescindíveis para a determinação do ângulo de incidência da radiação solar (θ) e, conseqüentemente, para a determinação dos efeitos do sombreamento (η_{shadow}), das perdas finais nas extremidades do coletor (η_{endloss}) e do modificador do ângulo de incidência (K), que constituem parâmetros da Equação 04.

No SOLPOS, a determinação dos valores diários médios mensais do ângulo de elevação do Sol (α_s) e o azimute solar (γ_s) foram feitos considerando o dia médio de cada mês segundo RABL (1965) – Anexo D, para as cidades de Recife, Arcoverde, Serra Talhada e Petrolina, escolhidas para aplicação do modelo, no ano de 2013. Como dados de entrada no algoritmo foram informados a localização geográfica de cada município e as informações de pressão na superfície, temperatura de bulbo seco e de Tempo Universal Coordenado (*Coordinated Universal Time* - UTC), como mostra a Tabela 21.

Tabela 21 – Informações de Localização, Condições Meteorológicas e de Tempo Universal Coordenado para Uso no Algoritmo SOLPOS.

Município	Localização Coordenadas Geográficas	Pressão na Superfície	Temperatura de Bulbo Seco	UTC
Recife	08° 03' 14'' S 34° 52' 51'' W	1015,5 mbar	24,00°C	-3.0
Arcoverde	08° 25' 15'' S 37° 03' 41'' W	937,5 mbar	24,30°C	-3.0
Serra Talhada	07° 59' 09'' S 38° 17' 45'' W	955,2 mbar	25,20°C	-3.0
Petrolina	09° 23' 24'' S 40° 30' 28'' W	970,1 mbar	26,08°C	-3.0

Informações acerca da pressão na superfície e temperatura de bulbo seco foram obtidas no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Uma vez determinados os valores diários médios mensais do ângulo de elevação do Sol (α_s) e o azimute solar (γ_s), foram calculados os valores diários médios mensais dos efeitos do sombreamento (η_{shadow}), das perdas finais nas extremidades do coletor (η_{endloss}) e do modificador do ângulo de incidência (K), utilizando, respectivamente, as Equações 06, 07 e 08, em cada localidade, considerando oito horas de coleção. (Apêndice A).

Devido à similaridade entre os valores encontrados, o valor adotado para representar os efeitos do sombreamento (η_{shadow}), as perdas finais nas extremidades do coletor (η_{endloss}) e o modificador do ângulo de incidência (K) para o estado de Pernambuco (média mensal) foi o valor médio de cada um desses efeitos, associado a cada mês do ano, para os municípios de Recife, Arcoverde, Serra Talhada e Petrolina. Os valores adotados para Pernambuco estão mostrados na Tabela 22.

Tabela 22 – Valores Usados na Representação dos Efeitos de Sombreamento, Perdas nas Extremidades do Coletor e do Modificador do Ângulo de Incidência em Pernambuco.

Pernambuco	Efeito do Sombreamento (η_{shadow})	Perdas na Extremidade do Coletor (η_{endloss})	Modificador do Ângulo de Incidência (K)
Jan	0,935252	0,974045	0,999449
Fev	0,919750	0,989280	0,997337
Mar	0,917921	0,992199	0,993516
Abr	0,920820	0,971280	0,990202
Mai	0,917181	0,953182	0,986803
Jun	0,905048	0,944164	0,976784
Jul	0,892806	0,948822	0,982194
Ago	0,908305	0,964375	0,995371
Set	0,935865	0,984224	0,998029
Out	0,958593	0,995908	0,999166
Nov	0,965893	0,978788	0,997384
Dez	0,970217	0,970087	0,999539
Anual	0,92613	0,97219	0,992981

Os demais parâmetros utilizados para a determinação da energia térmica absorvida ($\dot{Q}_{\text{inc}}$) estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Coeficientes Usados na Determinação da Energia Térmica Absorvida

Parâmetro	Valor	Unidade
η_{opt}	0,7330	-
$\text{Cl} \cdot x_{\text{field}}$	0,96	-
DNI	Dado espacial	Wh/m ²
A_{SF}	510.000	m ²

Coeficientes usados na determinação do $\dot{Q}_{\text{inc}}$: o valor da eficiência óptica foi aquele obtido por SHENK e ECK (2012). O termo $\text{Cl} \cdot x_{\text{field}}$ foi obtido de MORIN et al., (2012).

Para a determinação das perdas térmicas ($\dot{Q}_{\text{loss}}$) foram usadas as Equações 09 e 10. Nelas, o termo que representa as perdas térmicas adicionais existentes na tubulação do campo solar ($q_{\text{pipe loss}}$) foi estimado como sendo 10W/m^2 . A temperatura do fluido na entrada do campo solar ($T_{f,\text{in}}$) e a temperatura do fluido na saída do campo solar ($T_{f,\text{out}}$) foram estimadas como 280°C (553K) e 411°C (684K), respectivamente, (MORIN et al., 2012). As perdas térmicas foram calculadas considerando-se 12 horas de operação da usina.

Após a determinação da energia térmica gerada no campo solar, fez-se a simulação da produção de energia elétrica (P_{net}) a partir do uso da Equação 13, a qual relaciona a energia térmica gerada na usina ($\dot{Q}_{\text{field}}$), a eficiência nominal do ciclo de potência (η_{nom}), a energia térmica nominal do campo solar ($\dot{Q}_{\text{field,nom}}$), o comportamento parcial das cargas no ciclo de potência (k) e os consumos elétricos parasitários do campo solar ($P_{\text{Par,SF}}$) e do ciclo de potência ($P_{\text{Par,PB}}$). Na Equação 13, o valor utilizado para a eficiência nominal do ciclo de potência foi $\eta_{\text{nom}} = 0,32$, e a diferença entre o consumo elétrico parasitário do campo solar ($P_{\text{Par,SF}}$) e o consumo elétrico parasitário do ciclo de potência ($P_{\text{Par,PB}}$) foi 5% ($P_{\text{Par,SF}} - P_{\text{Par,PB}} = 0,05$). O termo $\left[\frac{\dot{Q}_{\text{field}}}{\dot{Q}_{\text{field,nom}}} \right]^k$ foi considerado igual a 1. O resultado é integrado ao ano para obter a produção de energia anual da usina solar (E_{year}).

3.3.2.6 Modelagem da Equação do Custo de Produção de Energia Elétrica no SIG

Uma vez determinados o custo total de infraestrutura e a produção anual de energia elétrica da usina solar, fez-se a modelagem da equação do custo de produção de eletricidade, Equação 14, no ambiente do SIG.

Para a modelagem também foi utilizado o recurso *Raster Calculator* do ArcGIS 10.1. Nele foram inseridos os arquivos *raster* relativos ao custo total de infraestrutura e à produção anual de energia elétrica, bem como, os parâmetros que representam o custo de investimento da usina solar (I_{plant}), a taxa de retorno do capital (i), o tempo de vida útil da usina (n) e o custo com os trabalhadores (C_{per}), apresentados na Tabela 24. Como resultado final deste processo, foram obtidos os valores do custo de produção de energia elétrica para Pernambuco.

3.3.2.7 Determinação do Custo de Produção de Energia Elétrica

Os valores do custo de produção de eletricidade para o estado de Pernambuco foram obtidos após o processo de modelagem da Equação do custo (Eq. 14) no SIG e encontram-se apresentados no Capítulo 4.

3.3.2.8 Análises de Disponibilidade de Área

Após a definição do custo de produção de eletricidade para o estado de Pernambuco, foram realizadas análises de disponibilidade de área visando à instalação dos projetos. Nestas análises, foram extraídas do modelo as regiões com características desfavoráveis à instalação das usinas solares (áreas de restrição) como também foram observadas as questões relativas à definição de área para a execução dos projetos.

As análises de disponibilidade de área são mostradas no Capítulo 4.

3.3.2.9 Localização da Usina Solar Termoelétrica

Após a realização das análises de disponibilidade de área, fez-se a identificação das áreas promissoras para o desenvolvimento da tecnologia no estado de Pernambuco, a partir da consideração dos seguintes aspectos: menores custos de produção de energia, maior produção anual de eletricidade e menores distâncias para os elementos de interligação elétrica, hídrica e rodoviária da usina solar. A definição das áreas aptas é também mostrada no Capítulo 4.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados do Estudo de Localização pelo uso do Método AHP

A apresentação dos resultados obtidos com a utilização do método AHP na definição das áreas aptas à instalação em Pernambuco começa pela exposição da aptidão individual dos indicadores positivos definidos no estudo. Na sequência são apresentadas as áreas aptas à instalação, em classes de aptidão, para cada cenário gerado neste estudo e os procedimentos de validação do modelo que foram realizados.

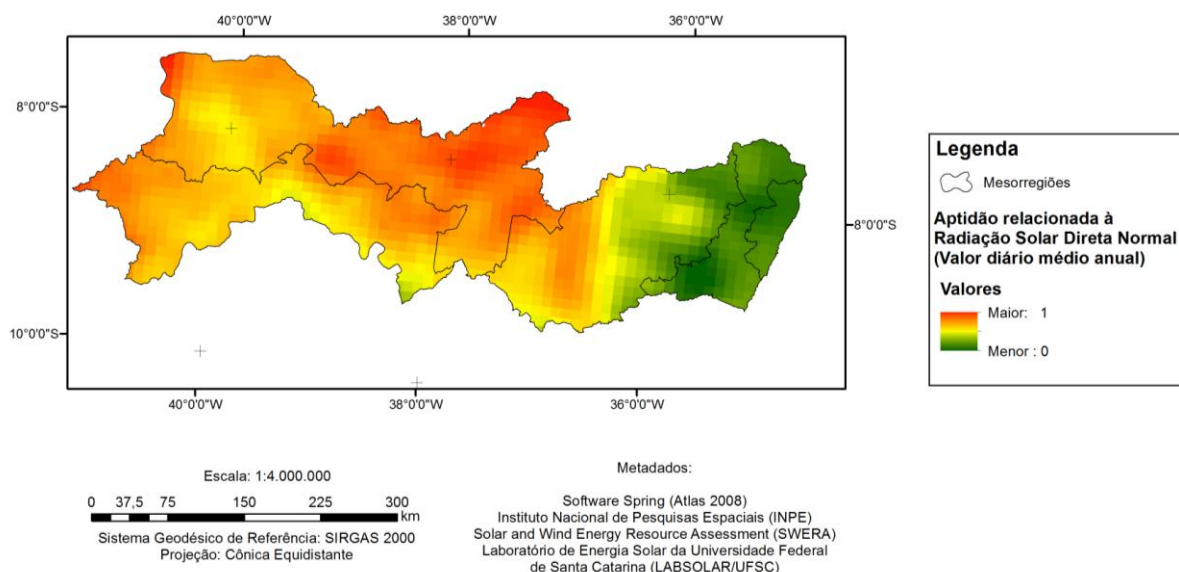
4.1.1 Apresentação da Aptidão Individual dos Indicadores Positivos

4.1.1.1 Aptidão relacionada à Radiação Solar Direta Normal

A disponibilidade de radiação solar direta normal numa dada localidade é essencial para simular a produção de energia elétrica nesta localidade. Valores da ordem de $5,0\text{kWh/m}^2$ (valor diário médio anual) são usualmente considerados, em escala mundial, como valores mínimos para a escolha do local de instalação da usina solar em função da garantia da eficácia dos projetos. Deste modo, quanto maiores os índices de radiação solar, maior será a aptidão das áreas para a implantação dos projetos.

Com relação aos aspectos apresentados no parágrafo anterior, verifica-se que a função *fuzzy* sigmoidal do tipo crescente, com ponto de controle fixado em $5,0\text{kWh/m}^2$ (5.000Wh/m^2) é a mais indicada para representar os valores normalizados da radiação solar. Em virtude disso, esses valores foram os utilizados. O resultado desta inferência está apresentado na Figura 58.

Figura 58 – Mapa da Aptidão Individual da Radiação Solar Direta Normal.



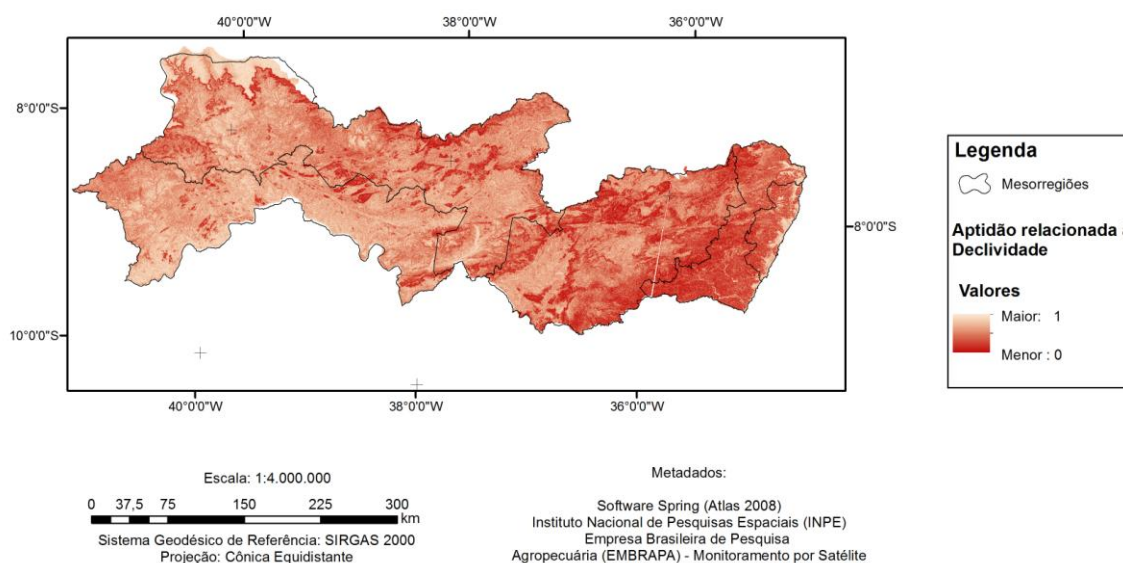
Da Figura 58, verifica-se que, a maior aptidão relacionada à radiação solar direta normal (valor 1) está localizada no Sertão Pernambucano, sobretudo na região do Pajeú, onde estão os municípios de Flores, Carnaíba, Afogados da Ingazeira, Calumbi, Santa Cruz da Baixa Verde, Quixaba, Solidão, Tabira, Ingazeira, Tuparetama, Igaraci, São José do Egito, Santa Terezinha, Brejinho e Itapetim. Outras regiões com características semelhantes são encontradas nos municípios de Salgueiro, Sertânia, São José do Belmonte e Serra Talhada, também no Sertão Pernambucano e em Afrânio, município da mesorregião do São Francisco Pernambucano.

Em contrapartida, a menor aptidão (valor 0) está localizada nas mesorregiões Metropolitana do Recife, Mata Pernambucana e Agreste Pernambucano, e abrange mais de 30 municípios, entre eles, os municípios do litoral Norte (Olinda, Paulista, Abreu e Lima, Igarassu, Itapissuma, Ilha de Itamaracá), da Mata Norte (Paudalho, Goiana, Itaquitinga, Araçoiaba, Itambé, entre outros), da Mata Sul (Palmares, Xexéu, Água Preta, Gameleira, Ribeirão, entre outros) e do Agreste Pernambucano (Bonito, Salgadinho, Passira, Limoeiro e João Alfredo).

4.1.1.2 Aptidão relacionada à Declividade

O indicador declividade do terreno define a aceitabilidade da área segundo seu impacto no custo relativo à preparação e o nivelamento do terreno e, por isso, o local de implantação da usina solar deverá ser o mais plano possível. Para atender a este requisito, vários estudos indicam a utilização do valor de 5% de inclinação do terreno como o limiar máximo para a inserção dos projetos. Por isso, este valor foi utilizado como ponto de controle na normalização e a função *fuzzy* utilizada foi a sigmoideal decrescente, uma vez que quanto maior a declividade do terreno, menor a aptidão da área para a instalação dos projetos. O resultado desta inferência está mostrado na Figura 59.

Figura 59 – Mapa da Aptidão Individual da Declividade do Terreno.



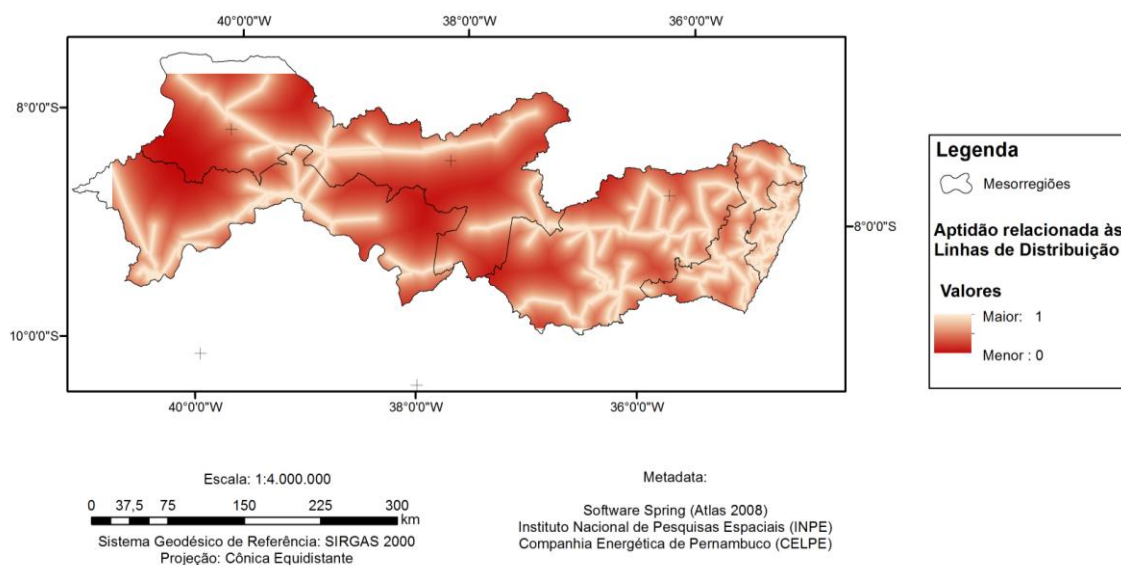
Observando a Figura 59 verifica-se que a maior aptidão (valor 1) é encontrada, especialmente nas mesorregiões do Sertão, Agreste e do São Francisco Pernambucano. Por outro lado, a menor aptidão (valor 0) é encontrado, principalmente, nas mesorregiões Metropolitana do Recife, Mata Pernambucana e Agreste Pernambucano.

4.1.1.3 Aptidão relacionada à Distância das Linhas de Distribuição

A conexão com o setor elétrico é importante para o transporte da energia elétrica gerada na usina solar até os centros de consumo. Como os custos de construção de novas linhas de distribuição são, em geral, elevados é preciso que a usina solar seja instalada o mais próximo possível das linhas já existentes, que apresentem capacidade de carga. Deste modo, a aceitabilidade do local segundo ao parâmetro linhas de distribuição está na avaliação da proximidade entre a usina solar até tais linhas e, quanto maiores às distâncias da usina solar as linhas de distribuição, menos apta é a área para a instalação dos projetos.

A função de pertinência *fuzzy* usada para a normalização foi a sigmoideal decrescente, com ponto de controle definido em 15km (valor arbitrado para a avaliação da metodologia baseando-se no fato de que os custos de construção de novas linhas aumentam bastante com o aumento da distância). O resultado do *layer* normalizado está apresentado na Figura 60.

Figura 60 – Mapa da Aptidão Individual do Indicador Distância às Linhas de Distribuição.



Da Figura 60, é possível verificar que a maior aptidão (valor 1) está presente em todas as mesorregiões de Pernambuco, sobretudo no Agreste, na Zona da Mata Pernambucana e na mesorregião Metropolitana do Recife. Já a menor aptidão (valor 0) está localizada no extremo Oeste do estado, na região limítrofe entre o Sertão e o São Francisco Pernambucano, onde estão situados os municípios de Santa Filomena, Dormentes, Lagoa Grande e Santa Cruz e na região central do estado, onde estão situados os municípios de Floresta e Betânia.

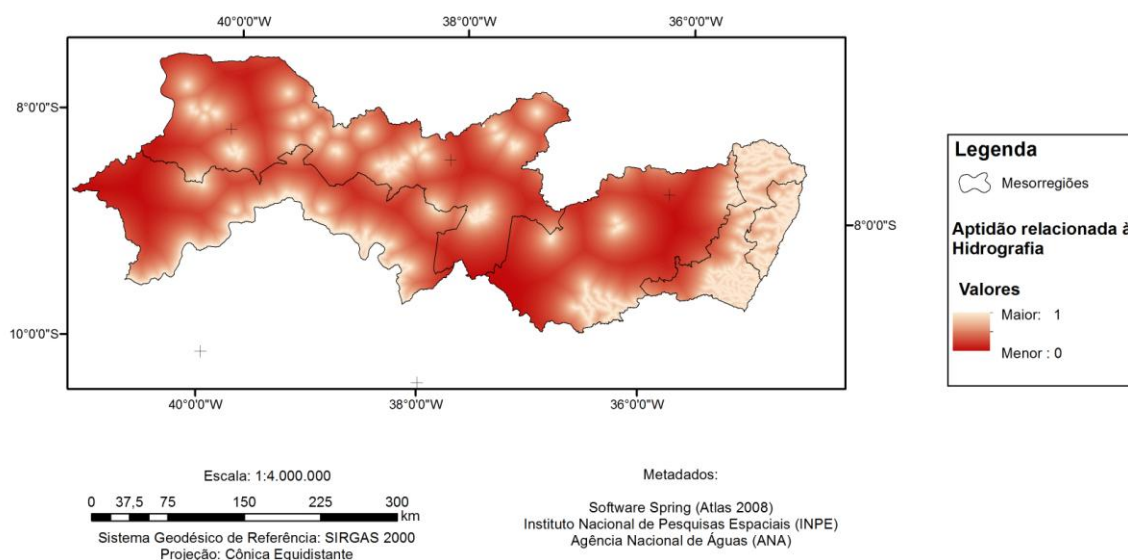
4.1.1.4 Aptidão relacionada à Distância dos Recursos Hídricos

A proximidade dos recursos hídricos com a usina solar também é importante para os sistemas que fazem uso do resfriamento úmido. Como visto anteriormente, dos 2.000.000m³ de água usados por uma usina SEGS de 80MW, trabalhando 12h por dia, durante um ano, cerca de 90% da água é usada para as torres de refrigeração. O restante é usado para geração de vapor (8%) e limpeza dos espelhos (2%).

Para evitar grandes custos com a construção de novas adutoras, é importante que a usina solar se encontre o mais próximo possível dos recursos hídricos. Assim, quanto maiores às distâncias da usina solar aos recursos hídricos, menor é a aptidão da área para a instalação.

A função de pertinência *fuzzy* usada para a normalização aqui também foi a sigmoidal decrescente, com ponto de controle definido em 20km (valor também arbitrado em função de se obter menores custos de construção de novas adutoras). O resultado do *layer* normalizado está apresentado na Figura 61.

Figura 61 – Mapa da Aptidão Individual do Indicador Distância aos Recursos Hídricos.



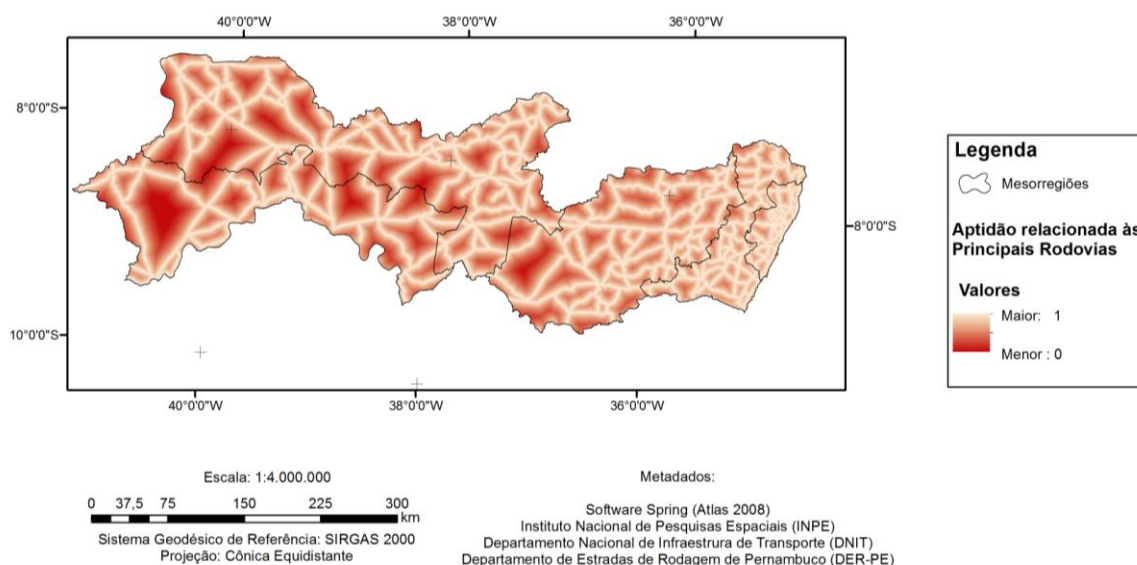
Da Figura 61, verifica-se que a maior aptidão está presente em todas as mesorregiões do Estado, principalmente na Mata Pernambucana e na mesorregião Metropolitana do Recife. Por outro lado, a menor aptidão está localizada no Agreste do Estado, onde estão localizados os municípios de Bezerros, Caruaru e Riacho das Almas e Itaíba; no Sertão Pernambucano, sobretudo em Manari; e no extremo Oeste do São Francisco Pernambucano, onde estão localizados os municípios de Dormentes, Afrânio e Petrolina.

4.1.1.5 Aptidão relacionada à Distância das Principais Rodovias

A proximidade da usina solar com as principais rodovias é relevante para transportar os equipamentos de grande porte e frágeis como os espelhos e pode apresentar, inclusive, forte reflexo no custo de infraestrutura da usina solar se, por exemplo, demandar a construção de novas rodovias para atender regiões favoráveis à instalação de projetos CSP, mas distantes das rodovias já existentes. Assim, para as rodovias, quanto maior for a distância deste parâmetro para a usina solar, menor aptidão para a inserção dos projetos apresentará a área.

A função de pertinência *fuzzy* usada para a normalização das rodovias também foi a sigmoideal decrescente, com ponto de controle definido em 20km (valor também arbitrado em função de se obter menores custos de construção de novas rodovias). O resultado desta inferência está mostrado na Figura 62.

Figura 62 – Mapa da Aptidão Individual do Indicador Distância às Principais Rodovias.

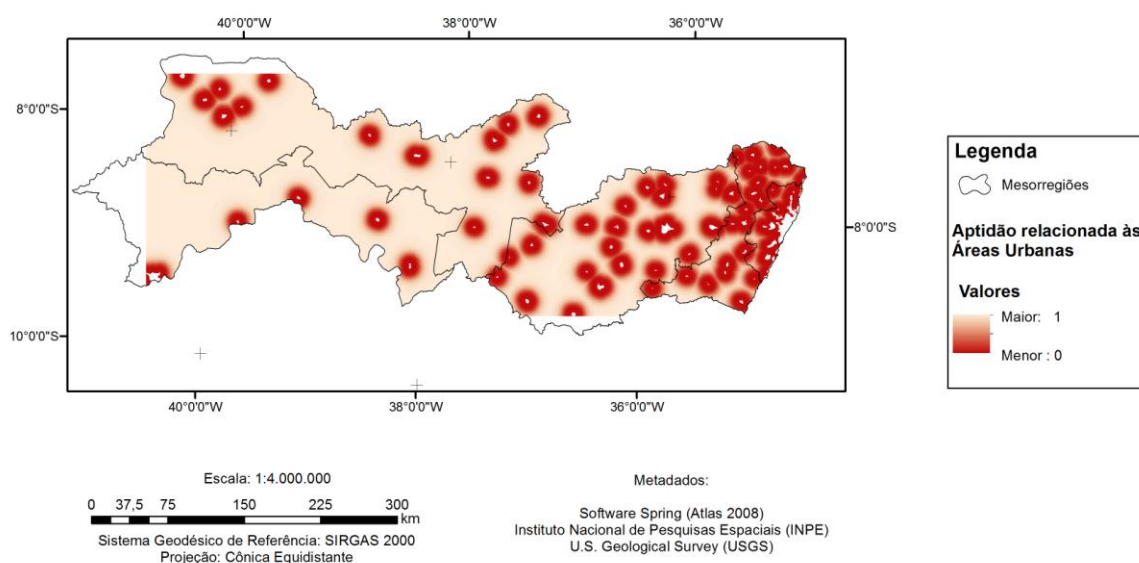


Da Figura 62, verifica-se que as rodovias estaduais e federais são bem distribuídas ao longo do território pernambucano. A maior aptidão (valor 1) deste indicador está presente em todas as mesorregiões do estado. Por outro lado, a menor aptidão (valor 0) é mais visível na região limítrofe entre as mesorregiões do Sertão e São Francisco Pernambucano, na parte Nordeste do município de Petrolina, na mesorregião do São Francisco Pernambucano e no Sudoeste do Agreste Pernambucano.

4.1.1.6 Aptidão relacionada à Distância das Áreas Urbanas e de Expansão Urbana

Para as áreas urbanas e de expansão urbana, o relacionamento com a distância para a usina solar é diferente dos outros indicadores já vistos. Para estas regiões a maior aptidão é dada em função das maiores distância a este parâmetro já que se pretende preservar este ambiente. Assim, a função de pertinência *fuzzy* usada para a normalização deste indicador foi a sigmoidal crescente, com ponto de controle definido em 10km (valor arbitrado), já que quanto maiores às distâncias entre as áreas urbanas e a usina solar, maior aptidão apresentará a área. O resultado do *layer* normalizado é apresentado na Figura 63.

Figura 63 – Mapa da Aptidão Individual do Indicador Distância às Áreas Urbanas e de Expansão Urbana.



Observando a Figura 63, verifica-se que a maior aptidão (valor 1) é encontrada em todas as mesorregiões do Estado, especialmente, na região limítrofe entre as mesorregiões do Sertão e do São Francisco Pernambucano, onde estão situados os municípios de Dormentes, Santa Filomena e Petrolina. Em contrapartida, a menor aptidão (valor 0) pode ser encontrada de forma mais intensa nas mesorregiões Metropolitana do Recife e Mata Pernambucana, mas também é vista em todas as mesorregiões de Pernambuco.

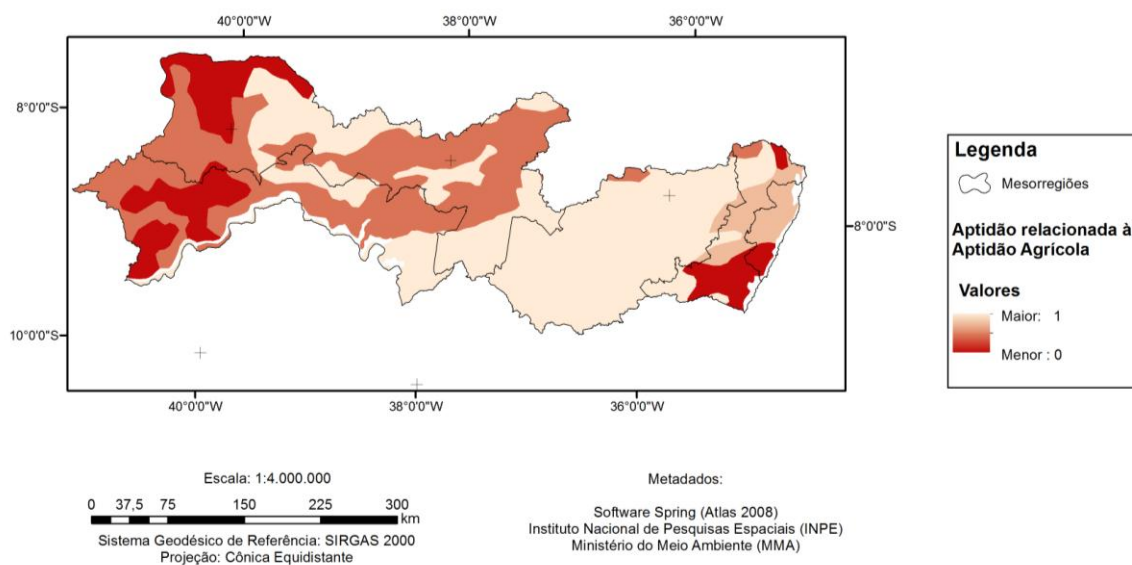
4.1.1.7 Aptidão relacionada ao Uso e Ocupação do Solo

Com relação ao uso e ocupação do solo, verifica-se que, as áreas não utilizadas para fins de produção agrícola são as mais indicadas para a instalação da usina solar. Assim, quanto maior a aptidão agrícola da área, menor é a aptidão para a instalação da usina solar.

As classes de aptidão para o layer de aptidão agrícola, mostradas na Figura 46, foram definidas em seis grupos: alta, regular, regular a restrita, restrita, restrita a desfavorável e desaconselhável. Todas elas foram consideradas na normalização em *fuzzy*. Convém ressaltar, todavia, que a área de alta aptidão foi definida como integrante do grupo de exclusão.

Para o processo de normalização foi criada uma escala ordinal (1, 2, 3,...) para o *layer* de aptidão agrícola visando estabelecer uma ideia de prioridade para o atributo que apresentava escala nominal (alta, regular, entre outros.). Com isso, foi definido o ponto de controle para a função sigmoideal decrescente (valor ordinal relativo à classe Restrita). Assim, aptidões mais baixas que a restrita (restrita a desfavorável e desaconselhável.) foram consideradas mais aptas à instalação da usina solar e vice-versa. O resultado desta inferência está na Figura 64.

Figura 64 – Mapa da Aptidão Individual do Indicador Uso e Ocupação do Solo.



Da Figura 64, observa-se que a maior aptidão (valor 1) está presente em todas as mesorregiões do Estado, com grandes porções de área nas mesorregiões do Agreste, Sertão e do São Francisco Pernambucano. Já nas mesorregiões Metropolitana do Recife e Mata Pernambucana, o quantitativo de área classificada como de maior aptidão é bem menor.

Regiões com menor aptidão (valor 0) são encontradas no Nordeste do Sertão Pernambucano, na parte Oeste do São Francisco Pernambucano e também nas mesorregiões Metropolitana do Recife (parte Sul) e na Mata Pernambucana (parte Sul, principalmente).

Valores intermediários são encontrados, sobretudo nas mesorregiões do Sertão e do São Francisco Pernambucano.

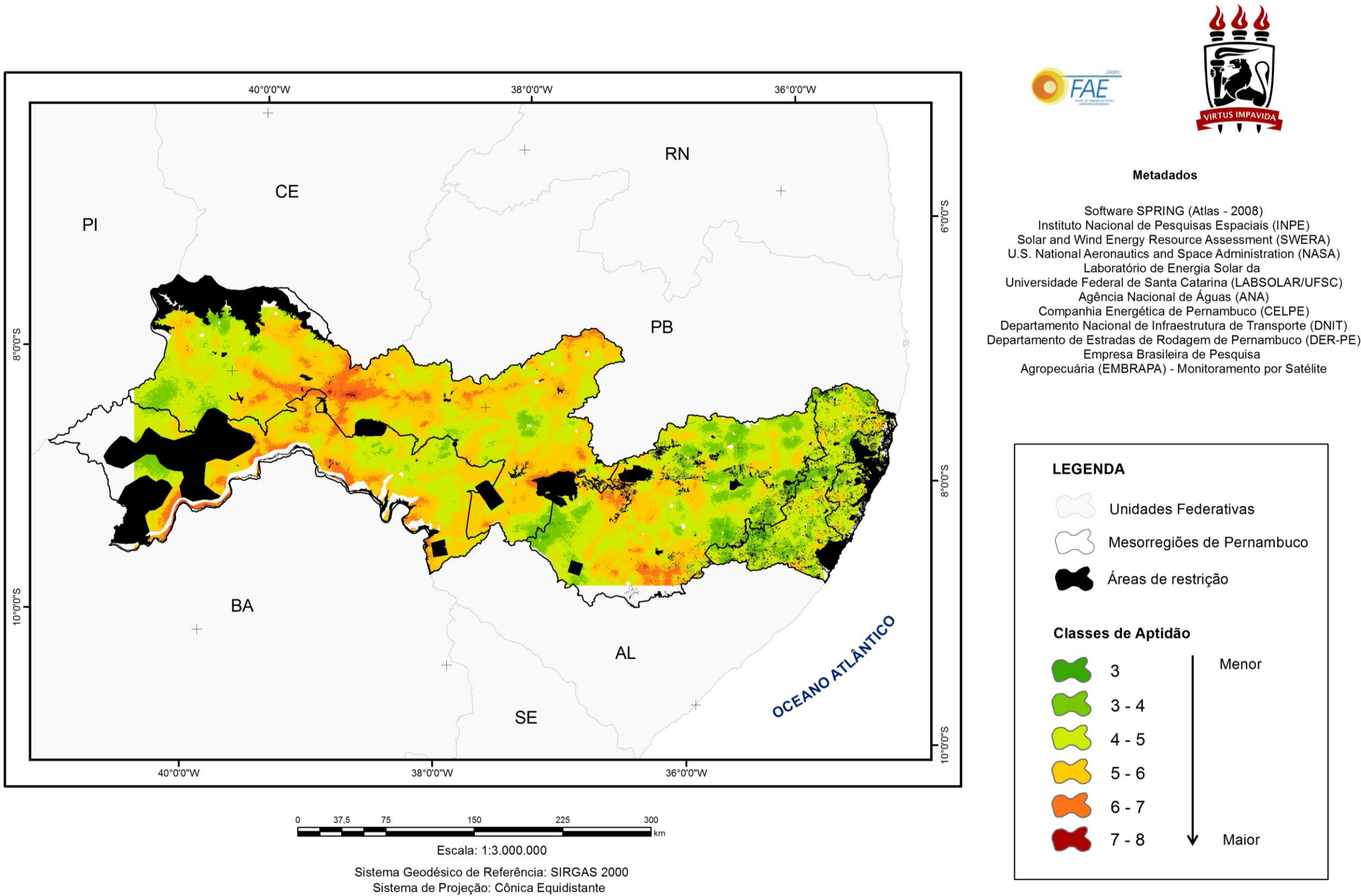
4.1.2 Identificação das Áreas Aptas à Instalação pelo Método AHP

Uma vez definidos os *layers fuzzy* relativos aos indicadores positivos, fez-se uso da técnica WLC para combinar tais *layers* com seus respectivos pesos e também com as áreas de exclusão. O objetivo deste procedimento foi o de identificar as áreas aptas para à instalação.

Para auxiliar a identificação das áreas aptas foi utilizado o recurso *Reclassify* do ArcGIS 10.1 para definir as classes de aptidão na escala de 1 a 9.

Também foi gerado um Cenário sem pesos - chamado Ponto de Partida - para definir as áreas aptas à instalação a partir do uso de todos os indicadores do estudo (positivos e as restrições), mas sem a consideração dos pesos. Também competiu a este cenário, servir como referencial para analisar a influência da ponderação no resultado final dos três cenários criados. O Cenário Ponto de Partida está apresentado na Figura 65.

Figura 65 – Mapa de Aptidão das Áreas para Instalação de Usinas Solares de 80MWe no Estado de Pernambuco – Cenário Ponto de Partida



Do Mapa da Figura 65 observa-se que, o modelo gerou apenas seis classes de aptidão. A maior aptidão (classe 7 a 8) para a instalação das usinas solares no Cenário **Ponto de Partida** foi encontrada nas mesorregiões do Agreste, Sertão e São Francisco Pernambucano ao passo que a menor (classe 3) foi encontrada na mesorregião do Agreste Pernambucano e na Mata Pernambucana.

No Sertão Pernambucano, a classe de maior aptidão (classe 7 a 8) foi encontrada, sobretudo, em regiões dos municípios de Parnamirim, Salgueiro e Verdejante, situados na parte central dessa mesorregião; e também na divisa entre os municípios de Sertânia e Ibimirim, localizados na porção Sudeste desta mesorregião, próximo ao limite com o Agreste Pernambucano.

A região que abrange os municípios de Parnamirim, Salgueiro e Verdejante dispõe de índices de radiação solar direta da ordem de $5,0\text{kWh/m}^2.\text{dia}$ (média anual), terrenos com declividades não tão acentuadas e aptidão agrícola com classificação desaconselhável e regular a restrita. Com relação aos elementos de infraestrutura, verifica-se que a região dispõe de proximidade com a rede elétrica a partir de linhas de 69kV e 138kV; proximidade com os recursos hídricos (através do açude Bela Vista, localizado na região limítrofe de Salgueiro e Verdejante; e açude Abóboras, situado na divisa dos municípios de Parnamirim e Serrita), e proximidade com as rodovias federais e estaduais existentes na região (BR-232, BR-316, BR-361, PE-460, entre outras). Com relação às distâncias para as áreas urbanas, também se verifica que esta região é favorável para a instalação das usinas solares, uma vez que, apresenta distâncias superiores a 10km dos centros urbanos. Ainda para as áreas de restrição, se verifica que há disponibilidade para a instalação dos projetos.

Na divisa entre os municípios de Sertânia e Ibimirim, muitas condições são favoráveis à instalação dos projetos, como, por exemplo, os altos índices de radiação solar direta (os quais são superiores a $5,0\text{kWh/m}^2.\text{dia}$ – média anual), a existência de terrenos com baixos valores de declividade (em geral, menor que 5%) e a possibilidade de interligação elétrica (linhas de distribuição de 69kV); interligação hídrica (açude Poço da Cruz, localizado em Ibimirim); interligação rodoviária (PE-315, PE-312, BR-232, entre outras). Com relação às distâncias para as áreas urbanas e de expansão urbana, se verifica também que há áreas disponíveis para a instalação dos projetos dado que a distância para tais ambientes é maior que 10km. Um impeditivo que se coloca sobre esta região é a presença de uma área restrição (Unidade de Proteção Integral) sobre grande parte da região definida com classe de aptidão 7 a 8, todavia, ainda se verifica disponibilidade para a inserção da tecnologia na área restante.

Na mesorregião do São Francisco Pernambucano, os locais que apresentaram maior aptidão (classe 7 a 8) estão localizados, sobretudo, nos municípios de Petrolândia, Belém de São Francisco, Cabrobó, Orocó, Terra Nova, Santa Maria da Boa Vista, Lagoa Grande, Floresta e Petrolina. De modo geral, a maior aptidão encontrada para estes municípios está relacionada com a existência de regiões com suaves declividades (menores que 5%); às possibilidades de interligação elétrica (linhas de 69kV e 138kV), hídrica (rio São Francisco) e rodoviária (BR-316, BR-116, BR-428, BR-122, PE-570, entre outras); e o atendimento as especificações de distância para as áreas urbanas. Com relação à incidência de radiação solar direta, verifica-se que os valores são da ordem de 4,3kWh/m².dia a 5,0 kWh/m².dia (média anual) e, quanto as restrições de uso do solo, observa-se que, para os municípios de Petrolina, Lagoa Grande e Santa Maria da Boa Vista, o maior impedimento para o uso dessa região está na presença das áreas de restrição, caracterizada principalmente pelos ambientes de alta aptidão agrícola.

No Agreste Pernambucano a maior classe de aptidão (7 a 8) foi encontrada em regiões dos municípios de Brejão, Terezinha, Palmeirina, Lagoa do Ouro, Correntes, Bom Conselho e Garanhuns, situados ao Sul dessa mesorregião; e em regiões dos municípios de Pedra e Venturosa, situados próximo a divisa com Arcoverde, município da mesorregião do Sertão. De modo geral, a maior aptidão dessas regiões foi relacionada à presença de solos com aptidão agrícola desfavorável e restrita a desfavorável; à presença de elementos de infraestrutura rodoviária (BR-423, PE-214, PE-233, entre outros) e de infraestrutura elétrica (linhas de distribuição de 69kV); e o atendimento as especificações de distância para as áreas urbanas e de expansão urbana. Com relação à incidência de radiação solar, verifica-se que esta região dispõe de índices da ordem de 4,7 a 5,0kWh/m².dia (média anual) e a proximidade com o recurso hídrico somente é observada na região apta dos municípios de Pedra e Venturosa. Ainda, com relação às restrições de uso do solo foram observadas zonas de exclusão em boa parte dos municípios de Pedra e Venturosa (Remanescentes Florestais de Mata Atlântica), mas a parte restante é propícia para a instalação das usinas solares.

Regiões com menor aptidão (classes 3) foram localizadas nas mesorregiões do Agreste e na Mata Pernambucana, sobretudo em regiões dos municípios de Panelas, Cupira, Lagoa dos Gatos, Catende e Palmares. Nestas regiões a radiação solar está definida no intervalo de 3,8 a 4,3kWh/m².dia (média anual); os valores de declividade são, em geral, acentuados (maiores que 5%) e não se verifica possibilidades de interligação hídrica nem elétrica (neste caso para os municípios de Panelas, Cupira e Lagoa dos Gatos).

Classes de aptidão definidas no intervalo de 3 a 5 foram localizadas em todas as mesorregiões do Estado, sobretudo nas mesorregiões do Agreste (parte Leste), Metropolitana do Recife e Mata Pernambucana. Na mesorregião do Sertão, áreas com esta característica também foram encontradas, sobretudo no extremo Oeste dessa mesorregião, onde se situa o município de Santa Filomena que embora apresente alta radiação solar direta (da ordem de 5,0kWh/m².dia, média anual), apresenta valores de declividades acentuados (maiores que 5%) e ausência de possibilidades de interligação com a rede elétrica e com os recursos hídricos.

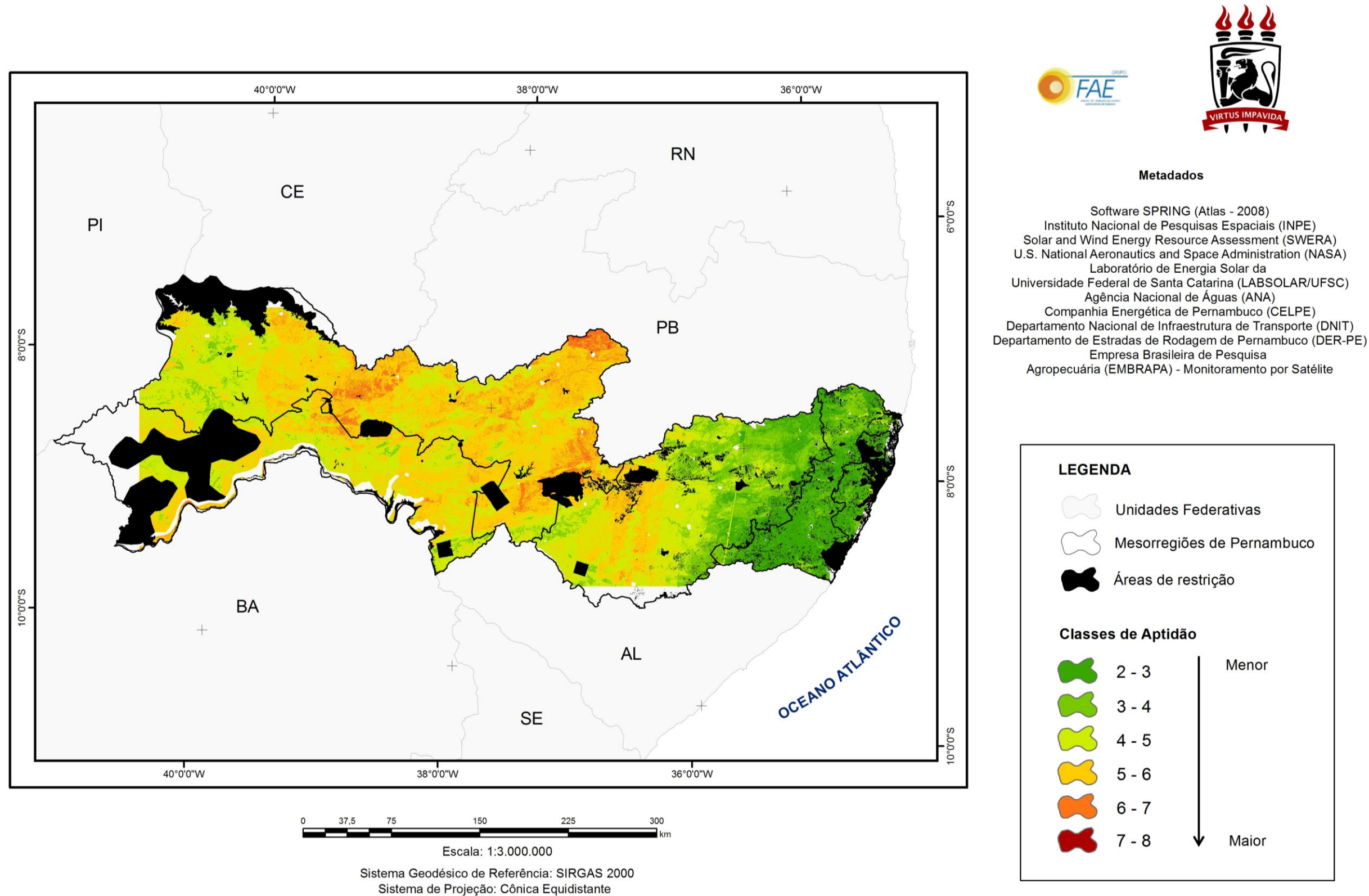
Classe de aptidão definidas no intervalo de 5 a 7 foram encontradas em todas as mesorregiões do estado.

Uma vez definido o Cenário Ponto de Partida, fez-se a determinação dos demais cenários do estudo.

4.1.2.1 Resultados Encontrados para o Cenário 1

No primeiro cenário do estudo, os *layers* temáticos foram combinados com seus respectivos pesos para a definição das áreas aptas. Neste cenário, os *layers* temáticos apresentaram as seguintes ponderações: radiação solar direta (42%), declividade (26%), uso do solo (18%), distância às linhas de distribuição (5%), distância aos recursos hídricos (4%), distância às principais rodovias (3%) e distâncias às áreas urbanas e de expansão (2%). O resultado desta agregação está mostrado no Mapa da Figura 66.

Figura 66 – Mapa de Aptidão das Áreas para Instalação de Usinas Solares de 80MWe no Estado de Pernambuco – Cenário 1



Na Figura 66, pode-se verificar o efeito da ponderação sobre os *layers* temáticos para a apresentação do mapa final no **Cenário 1**. Nele, também foram geradas seis classes de aptidão. A região com maior aptidão para a instalação das usinas solares (classe 7 a 8) foi encontrada na mesorregião do Sertão Pernambucano, enquanto que, a classe de menor aptidão (classe 2 a 3) foi encontrada nas mesorregiões Metropolitana do Recife, Mata Pernambucana e Agreste Pernambucano (parte Leste).

Os municípios do Sertão que apresentaram regiões com classe de aptidão definidas no intervalo de 7 a 8 foram, principalmente, Brejinho e Santa Terezinha, localizados na parte Nordeste dessa mesorregião. Também nos municípios de Salgueiro, Verdejante, Sertânia, Itapetim e Flores foi encontrada essa classe de aptidão, porém com um quantitativo de área bem menor.

As regiões com classe de aptidão 7 a 8 encontradas no modelo para os municípios de Brejinho e Santa Terezinha se caracterizam por apresentar índices altos de radiação solar direta (superiores a 5,2 kWh/m².dia - média anual), que é o critério de maior peso no cenário 1 (42%); valores de declividade do terreno suaves, incluindo inclinações menores que 4%, critério de segundo maior peso (26%); aptidão agrícola dos solos classificada como desaconselhável, critério com terceiro maior peso (18%); e proximidade com os elementos de infraestrutura elétrica (linhas de distribuição de 69kV), rodoviária (PE-413, PE-285, PE-320, entre outras) e hídrica (açudes sem toponímia no dado espacial), que juntos totalizam 12%.

Com relação à proximidade com as distâncias às áreas urbanas (critério de peso 2%), verifica-se que as regiões aptas dos municípios Brejinho e Santa Terezinha encontram-se distantes da principal área urbana da região, representada pelo município de São José do Egito (distâncias maiores que 10km; E com relação às áreas de restrição, verifica-se que não há impedimentos para a instalação das usinas solares, uma vez que a área de restrição mais próxima é a área urbana de São José do Egito.

Regiões com menor classe de aptidão foram localizadas, sobretudo, nas mesorregiões Metropolitana do Recife, Mata Pernambucana e Agreste Pernambucano (parte Leste), onde os índices de radiação solar são os mais baixos do estado (definidos no intervalo de 3,8 kWh/m².dia a 4,7 kWh/m².dia - média anual) e os valores de declividade de terreno são mais elevados. Além disso, nestas regiões são encontradas as maiores proximidades com as áreas urbanas e de expansão urbana com mais de 25.000 habitantes.

Classe de aptidão definidas no intervalo de 5,01 a 6 foram encontradas, notadamente, nas mesorregiões do Sertão, Agreste e São Francisco Pernambucano e abrangeram muitos municípios.

As classes de aptidão definidas entre 6 a 7 também abrangeram as mesorregiões do Sertão, Agreste e São Francisco Pernambucano. No Sertão, regiões com esta classe de aptidão foram encontradas, principalmente, nos municípios de Salgueiro, Verdejante e São José do Belmonte (na parte central dessa mesorregião); em Serra Talhada, Calumbi, Flores, Quixabá, Carnaíba, Afogados da Ingazeira, Igaraci, Tabira, São José do Egito, Santa Terezinha e Brejinho; e em regiões dos municípios de Ibimirim e Sertânia. Já na mesorregião do São Francisco Pernambucano, regiões com esta classe de aptidão foram encontradas, sobretudo, nos municípios de Floresta, Petrolândia e Tacaratu.

De modo geral, as áreas com classe de aptidão definidas no intervalo de 6 a 7, nessas duas mesorregiões, dispõem de índices altos de radiação solar (superiores a 5,0 kWh/m².dia - média anual, exceto para a região de Petrolândia e Tacaratu, onde os índices de radiação solar estão definidos no intervalo de 4,7 kWh/m².dia a 5,0 kWh/m².dia - média anual); terrenos com declividade suaves, principalmente em Floresta, Petrolândia e Tacaratu (mesorregião do Sertão) e em Ibimirim e Sertânia (mesorregião do Sertão); e aptidão agrícola dos solos classificada como desaconselhável, e restrita a desfavorável. Nessas regiões há também possibilidades de interligação elétrica com linhas de distribuição de 69kV e 138kV; possibilidades de conexão rodoviária com as várias rodovias federais e estaduais existentes (BR-232, PE-555, PE-320, PE-315, entre outros); e possibilidades de ligação hídrica com os recursos da região (o rio São Francisco para os municípios da mesorregião do São Francisco Pernambucano; e a represa de Serrinha, situada em Serra Talhada e o açude Poço da Cruz, localizado em Ibimirim, para os municípios do Sertão).

Com relação às restrições de uso do solo, verifica-se que boa parte dos municípios de Ibimirim e Sertânia apresentam impeditivos à instalação dos projetos, devido à presença de Unidades de Conservação de Proteção Integral. Todavia, na parte restante é possível instalar usinas solares. Também nas cidades de Serra Talhada, Igaraci, Afogados da Ingazeira e Salgueiro tem áreas de restrição (no caso, Áreas Urbanas), as quais tornam uma parte da região não favorável à instalação dos projetos.

No Agreste Pernambucano, regiões com classe de aptidão 6 a 7 foram encontradas, principalmente, em regiões dos municípios de Pedra, Venturosa, Alagoinha, Paratama, Salóá, Bom Conselho e Iati.

Classes de menor aptidão (valor 2 a 3) foram encontradas, em sua grande maioria, nas mesorregiões Metropolitana do Recife, Zona da Mata Pernambucana e Agreste Pernambucano (parte Leste).

Classes de aptidão de 3 e 5 foram encontradas em todas as mesorregiões do estado de Pernambuco, principalmente no Sertão Pernambucano, São Francisco Pernambucano e na mesorregião do Agreste Pernambucano.

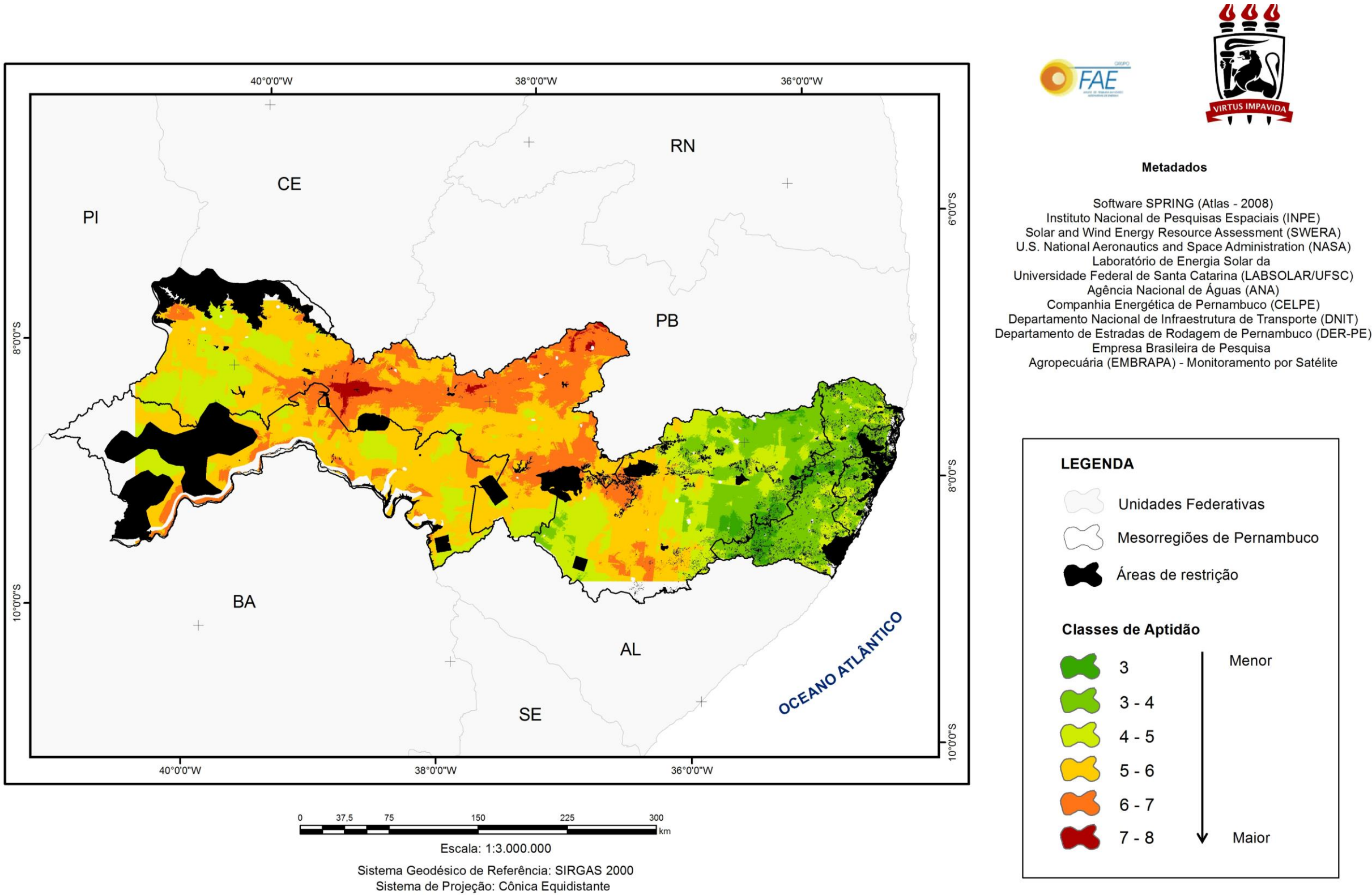
Fazendo uma análise comparativa entre os cenários Ponto de Partida e o Cenário 1, é possível perceber o efeito da ponderação nos *layers* temáticos na aptidão final. No Cenário Ponto de Partida, onde os *layers* temáticos não apresentaram ponderação, muitas regiões do São Francisco Pernambucano foram indicadas com forte aptidão (classes 7 a 8), sobretudo Belém de São Francisco, Cabrobó, Orocó, Santa Maria da Boa Vista, Lagoa Grande e Petrolina. Já no Cenário 1, onde os pesos foram considerados e a maior ponderação foi dada aos *layers* de radiação solar e declividade do terreno, os locais classificados com aptidão 7 a 8 foram, principalmente, os municípios de Brejinho e Santa Terezinha, localizados na parte Nordeste da mesorregião do Sertão.

Com relação às classes de menor aptidão, o efeito da ponderação dos *layers* também foi visível. No cenário Ponto de Partida, os municípios que se enquadraram nesta classificação foram localizados praticamente no Agreste Pernambucano, sobretudo em regiões dos municípios de Panelas, Cupira, Lagoa dos Gatos, Catende e Palmares. Entretanto, no Cenário 1, onde a radiação solar teve maior peso, quase todos os municípios da parte Leste do estado de Pernambuco, abrangendo as mesorregiões Metropolitana do Recife, Mata Pernambucana e a Agreste Pernambucano (parte Leste) apresentaram as menores classes de aptidão.

4.1.2.2 Resultados Encontrados para o Cenário 2

Para o segundo cenário do estudo, os *layers* temáticos apresentaram as seguintes ponderações: radiação solar direta normal (47%), distâncias às linhas de distribuição (14%), distâncias aos recursos hídricos (13%), distâncias às rodovias (10%), distâncias às áreas urbanas (9%), declividade (4%) e uso do solo (3%). O resultado da combinação para o cenário 2 está mostrado no Mapa da Figura 67.

Figura 67 – Mapa de Aptidão das Áreas para Instalação de Usinas Solares de 80MWe no Estado de Pernambuco – Cenário 2



Observando a Figura 67, se verifica que também foram geradas seis classes de aptidão para o **Cenário 2**. A maior classe foi definida no intervalo de 7 a 8 ao passo que a menor foi representada pelo valor 3.

Regiões de maior aptidão (7 a 8) foram encontradas na mesorregião do Sertão, sobretudo, em regiões dos municípios de Salgueiro, Verdejante, Serra Talhada, Calumbi, Triunfo, São José do Egito, Itapetim, Brejinho, Santa Terezinha, Solidão e Carnaíba. De modo geral, tais municípios dispõem de índices de radiação solar direta superiores a 5,0kWh/m².dia (média anual) – critério de maior peso neste cenário (47%); e apresentam possibilidades de interligação com a infraestrutura elétrica (linhas de distribuição de 69kV e 138kV), rodoviária (várias rodovias estaduais e federais, como a BR-232, PE-320) e hídrica (açude de Serrinha, localizado em Serra Talhada e açude Boa Vista, situado entre os municípios de Salgueiro e Verdejante e outros açudes sem toponímia no dado espacial), que juntos totalizam 37% do peso dado ao critério de localização.

Com relação à declividade do terreno, verifica-se que os terrenos não possuem inclinações tão acentuadas (em geral, menores que 5%), exceto nos municípios de Triunfo e Santa Cruz da Baixa Verde, onde a declividade pode chegar a valores maiores que este limiar; Quanto à aptidão agrícola dos solos, verifica-se que a aptidão agrícola característica dessa região é classificada como regular a restrita.

Regiões com classe de 6 a 7 foram encontradas nas mesorregiões do Sertão, São Francisco Pernambucano e do Agreste. No Sertão, os municípios que se enquadram nesta classificação estão situados, principalmente, nas partes central e Leste dessa mesorregião: Salgueiro, Mirandiba, Serra Talhada, Calumbi, Flores, Quixabá, Carnaíba, Afogados da Ingazeira, Iguaraci, Tabira, São José do Egito, Santa Terezinha e Brejinho. Também são encontrados ambientes em Araripina, Betânia, Sertânia, Custódia e Ibimirim com essa classe de aptidão.

Na mesorregião do São Francisco Pernambucano a classe de aptidão 6 a 7 foi encontrada, sobretudo, nos municípios de Floresta, Itacuruba, Belém de São Francisco, Cabrobó, Orocó, Lagoa Grande, Santa Maria da Boa Vista e Petrolina; Já no Agreste Pernambucano, essa classe de aptidão foi encontrada em Pedra, Venturosa e Alagoinha, situados na parte Noroeste dessa mesorregião; e em Brejão, Terezinha, Paranatama, Iati, Saloá e Bom Conselho, localizados na parte Sul dessa mesorregião.

Classes de menor aptidão (valor 3) foram encontradas, em sua grande maioria, nas mesorregiões Metropolitana do Recife, Mata Pernambucana e Agreste Pernambucano, onde os índices de radiação solar estão definidos no intervalo de 3,8 kWh/m².dia a 4,7 kWh/m².dia (média anual), os valores de declividade de terreno são mais elevados e há maior proximidade com as áreas urbanas e de expansão urbana consideradas no modelo.

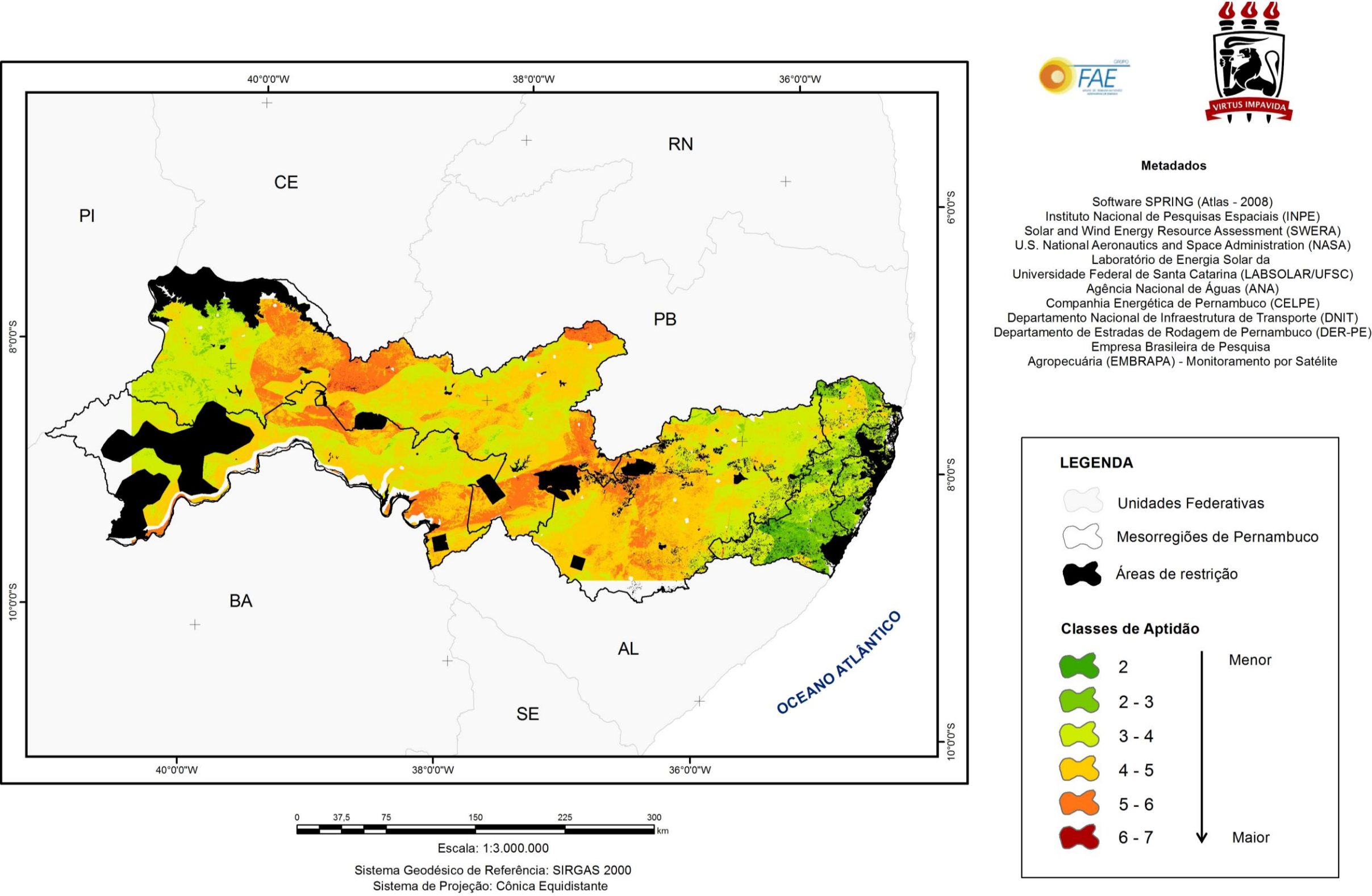
Classes de aptidão 4 e 5 foram encontradas em todas as mesorregiões do estado, principalmente nas mesorregiões do Sertão Pernambucano, São Francisco Pernambucano e Agreste Pernambucano (parte Leste).

Fazendo uma análise comparativa entre os resultados do Cenário 2 e os resultados do cenário Ponto de Partida, é possível fazer algumas considerações: No cenário Ponto de Partida, onde os *layers* não são ponderados, os municípios com menor aptidão foram localizados praticamente no Agreste Pernambucano, sobretudo na parte Leste desta mesorregião e nos municípios de Itaíba e Tupanatinga, situados na divisa com a mesorregião do Sertão Pernambucano. Entretanto, no Cenário 2, com a radiação solar apresentando maior peso, quase todos os municípios da parte Leste do estado de Pernambuco, abrangendo as mesorregiões Metropolitana do Recife, Mata Pernambucana e a Agreste Pernambucano (parte Leste) apresentaram as menores classes de aptidão.

4.1.2.3 Resultados Encontrados para o Cenário 3

Para o Cenário 3, os *layers* temáticos apresentaram as seguintes ponderações: uso do solo (40%), radiação solar direta normal (22%), declividade (20%) distâncias às linhas de distribuição (7%), distâncias aos recursos hídricos (5%), distâncias às rodovias (4%), distâncias às áreas urbanas (2%). O resultado da combinação para o Cenário 3 está mostrado no Mapa da Figura 68.

Figura 68 – Mapa de Aptidão das Áreas para Instalação de Usinas Solares de 80MWe no Estado de Pernambuco – Cenário 3



0 37,5 75 150 225 300 km

Escala: 1:3.000.000
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000
Sistema de Projeção: Cônica Equidistante

Do Mapa da Figura 68 verifica-se que também foram geradas seis classes de aptidão no **Cenário 3**. A maior aptidão (classe 6 a 7) para a inserção das usinas solares termoeletricas foi encontrada no Agreste, no Sertão e no São Francisco Pernambucano ao passo que a menor aptidão (classe 2) foi encontrada na Mata Pernambucana.

No Sertão Pernambucano, as regiões que apresentaram maior aptidão (classes 6 a 7) foram localizadas, sobretudo, em áreas dos municípios de Granito, Parnamirim, Exu, Cedro, Moreilândia, Serrita, Inajá, Salgueiro, Verdejante, São José do Belmonte, Serra Talhada, Venturosa, Sertânia, Ibimirim, Arcoverde, Santa Terezinha, Brejinho, Itapetim e São José do Egito. De modo geral, essas regiões apresentaram índices de radiação solar direta superiores a 5,0kWh/m².dia (média anual), exceto para o município de Granito cuja radiação solar é da ordem de 4,7 a 5,0kWh/m².dia (média anual); aptidão agrícola classificada como desfavorável e regular a restrita, o que favorece a instalação das usinas solares; valores de declividade do terreno não tão acentuadas e possibilidade de conexão com a rede elétrica (linhas de distribuição de 69kV), com o sistema hídrico (açude Poço da Cruz, localizado em Ibimirim, Represa de Serrinha em Serra Talhada, entre outros corpos d'água) e possibilidade de acesso rodoviário (BR-232, BR-116, entre outras). Com relação às especificações de distâncias para as áreas urbanas, verifica-se que nesta região há disponibilidade de áreas para a inserção dos projetos.

No São Francisco Pernambucano, classes de aptidão 6 a 7 são encontradas em regiões dos municípios de Petrolândia, Tacaratu, Cabrobó, Orocó, Carnaubeira da Penha, Belém de São Francisco, Floresta e Petrolina; Já no Agreste, essa classe de aptidão é encontrada em regiões dos municípios de Pesqueira, Pedra, Venturosa, Alagoinha, Caetés, Paratama, Garanhuns, Salóá, Brejão, Santa Terezinha e Bom Conselho.

Classes de menor aptidão (valor 2) foram encontradas principalmente na mesorregião da Mata Pernambucana, onde estão situados os municípios de Xexéu, Água Preta, Palmares, Gameleira, Joaquim Nabuco, Catende, Tamandaré e Barreiros. Verifica-se que estas regiões dispõem de aptidão agrícola *regular*, radiação solar direta da ordem de 3,8 a 4,3kWh/m².dia (média anual) e declividades bastante acentuadas. Quanto aos elementos de infraestrutura, verifica-se que há possibilidades de conexão com a rede elétrica (linhas de distribuição de 69kV) e com as principais rodovias (PE-079, PE099, BR-101), e possibilidades de ligação com os recursos hídricos (açudes). Com relação as distância as áreas urbanas, observa-se que a região dispõe de ambientes para a instalação dos projetos uma vez que as áreas urbanas não excluem todas as áreas, e, com relação ao uso do solo, se observam restrições de uso devido à presença dos Remanescentes Florestais de Mata Atlântica nesta região.

Fazendo um comparativo com o cenário Ponto de Partida, se verifica que as regiões de maior aptidão no Cenário 3 se deslocaram para a parte central do Estado (abrangendo as mesorregiões do Agreste, Sertão e São Francisco Pernambucano) e parte Nordeste do Sertão Pernambucano (onde estão as cidades de Santa Terezinha, Brejinho e Itapetim), exibindo um maior quantitativo de área disponível para a instalação. Tal deslocamento abrangeu, inclusive, regiões que no cenário Ponto de Partida obtiveram menor potencial de inserção (classes de aptidão mais baixas).

Considerando-se as todas as análises realizadas, foi possível estabelecer ambientes em Pernambuco aptos à instalação das usinas solares termoeletricas:

- a) **Município de Salgueiro:** Salgueiro está inserido na mesorregião do Sertão Pernambucano e possui uma população de 59.409 habitantes, segundo Estimativa Populacional do IBGE em 2014. Salgueiro apresentou, em todos os cenários do estudo, alto potencial para a instalação de usinas solares uma vez que se manteve na mais alta classe de aptidão em cada cenário apresentado (classe de aptidão de 7 a 8 nos cenários Ponto de Partida, 1 e 2; classe de aptidão 6 a 7 no cenário 3). O município tem índices de radiação solar direta normal acima de 5,0kWh/m².dia (médio anual) e valores de declividade não são tão acentuados. Com relação aos aspectos de infraestrutura, Salgueiro é bem provido de rodovias federais e estaduais (BR-232, PE-475 e da BR-116, por exemplo). As linhas de distribuição são de 69kV e 138kV e como corpo d'água mais próximo, o município conta com o Açude Bela Vista, localizado na fronteira com o município de Verdejante. Em termos de aptidão agrícola dos solos, verifica-se que o município tem boa parte do território com aptidão desaconselhável (partes Norte e Sul) e outra parte sendo regular a restrita (parte central do município). Com relação à proximidade com as áreas urbanas e de expansão, observa-se que o município apresenta regiões propícias para o desenvolvimento da tecnologia solar uma vez que as áreas urbanas não excluem totalmente a região apta. Com relação às áreas de exclusão, verifica-se que além de sua área urbana, Salgueiro tem regiões a serem preservadas, que constituem os territórios quilombolas. As áreas mais aptas à instalação são encontradas nas partes Norte e Sul do município.

- b) **Município de Verdejante:** O município de Verdejante tem uma população de 9.430 habitantes, segundo estimativa de 2014 do IBGE e também está localizado na mesorregião do Sertão Pernambucano. De modo análogo ao município de Salgueiro, Verdejante apresentou, em todos os cenários do estudo, alto potencial para a instalação de usinas solares já que se manteve na mais alta classe de aptidão em todos os cenários do estudo – classe de aptidão de 7 a 8 no cenário Ponto de Partida e cenários 1 e 2; e classe de aptidão de 6 a 7 no Cenário 3. Além disso, o município dispõe de índices de radiação solar direta anual acima de $5,0\text{kWh/m}^2.\text{dia}$ (valor médio) e possui declividades do terreno não tão acentuadas. O município é provido de infraestrutura elétrica por meio de linhas de distribuição de 69kV e 138kV, infraestrutura rodoviária pelas rodovias BR-361, BR-232 e PE-450 e infraestrutura hídrica pelo açude de Bela Vista (situado na região limítrofe com o município de Salgueiro). Com relação à aptidão agrícola dos solos, verifica-se que Verdejante apresenta, em quase toda sua extensão, aptidão desaconselhável, o que favorece a implantação das usinas solares. Com relação às distâncias para as áreas urbanas e de expansão urbana, verifica-se que o município possui boa distância dos centros urbanos de São José do Belmonte e Salgueiro, municípios que, possuem, respectivamente, 33.610 e 59.409 habitantes, e estão mais próximos de Verdejante. Também neste município não são encontradas áreas de restrição para a instalação dos projetos. As áreas mais aptas à instalação são encontradas na parte Sul do município.
- c) **Município de Sertânia:** Sertânia também está situada no Sertão Pernambucano e sua população, estimada em 2014 pelo IBGE, foi de 35.207 habitantes. Sertânia também apresentou alto potencial para a instalação das usinas solares, se mantendo na classe mais alta de aptidão em dois cenários do estudo (cenário Ponto de Partida – classe 7 a 8; cenário 3 – classe de 6 a 7) e na classe imediatamente abaixo da classe de maior aptidão nos cenários 1 e 2 (Sertânia apresentou classe 6 a 7). Ademais, o município possui índices de radiação solar direta normal da ordem de $5,0\text{kWh/m}^2.\text{dia}$ (médio anual) e declividades do terreno consideradas suaves (muitas áreas apresentam declividades menores que 5%). Com relação às infraestruturas, verifica-se que Sertânia dispõe de infraestrutura hídrica pelo uso do açude Poço da Cruz, localizado na região limítrofe com o município de Ibimirim.

Para a interligação rodoviária, Sertânia dispõe de rodovias estaduais e federais que cortam sua região, como por exemplo, a BR-232, a BR-110 e a PE-315. Para a ligação com rede elétrica, o município dispõe de linhas de distribuição de 69kV que se ligam com a mesorregião do Agreste Pernambucano, a qual, por sua vez, se interliga com as mesorregiões Metropolitana do Recife e Mata Pernambucana. Com relação à proximidade com as áreas urbanas, verifica-se que o município possui áreas disponíveis para a aplicação dos projetos uma vez que seu território apresenta alto potencial quanto à distância dos centros urbanos. A aptidão agrícola dos solos apresenta as classificações regular a restrita, restrita a desfavorável e desaconselhável, esta última na parte Leste do município. Restrições de uso do solo somente são verificadas na parte Sudeste do município, que constituem os Remanescentes Florestais da Mata Atlântica. As áreas mais aptas para a instalação dos projetos são encontradas na parte Sudoeste do município.

- d) **Município de Ibimirim:** Ibimirim também está situado na mesorregião do Sertão Pernambucano e tem uma população de 28.403 habitantes, segundo estimativa de 2014 do IBGE. Tal como o município de Sertânia, Ibimirim se manteve na classe de mais alta aptidão no Cenário Ponto de Partida (classe 7 a 8) e no cenário 3 (classe de 6 a 7); e na classe imediatamente abaixo da classe de maior aptidão, nos cenários 1 e 2 (classe de 6 a 7). Ibimirim possui valores de radiação solar direta da ordem de 5,0kWh/m².dia (média anual) e terrenos com declividade não acentuadas (menores que 5%, por exemplo). A aptidão agrícola dos solos, em boa parte da extensão do seu território, é considerada desaconselhável (parte Sul). Somente na parte Norte, sua aptidão é regular a restrita. Com relação às infraestruturas, verifica-se que o município possui interligação rodoviária por meios de rodovias federais e estaduais, como por exemplo, as rodovias PE-312, BR-110 e PE-360. A interligação hídrica poderá ser feita pelo açude Poço da Cruz, localizado na parte Norte do município, na fronteira com Sertânia. Para a rede elétrica, a interligação disponível se dá pelas linhas 69kV, que se interligam também com municípios do Agreste Pernambucano. Com relação à proximidade com as áreas urbanas e de expansão, verifica-se que a maior disponibilidade de área é existente nas partes Sul e Leste do município. Restrições quanto ao uso do solo são encontradas, sobretudo, na parte Nordeste de seu território. Deste modo, áreas mais aptas para a instalação de usinas solares são encontradas nas partes Sul e central do município.

Importante ressaltar que, além dos ambientes anteriormente citados, existem outros com características favoráveis a implantação de usinas solares termoeletricas em Pernambuco, como por exemplo, o município de Serra Talhada, localizado no Sertão Pernambucano, e o município de Floresta, situado na mesorregião do São Francisco Pernambucano.

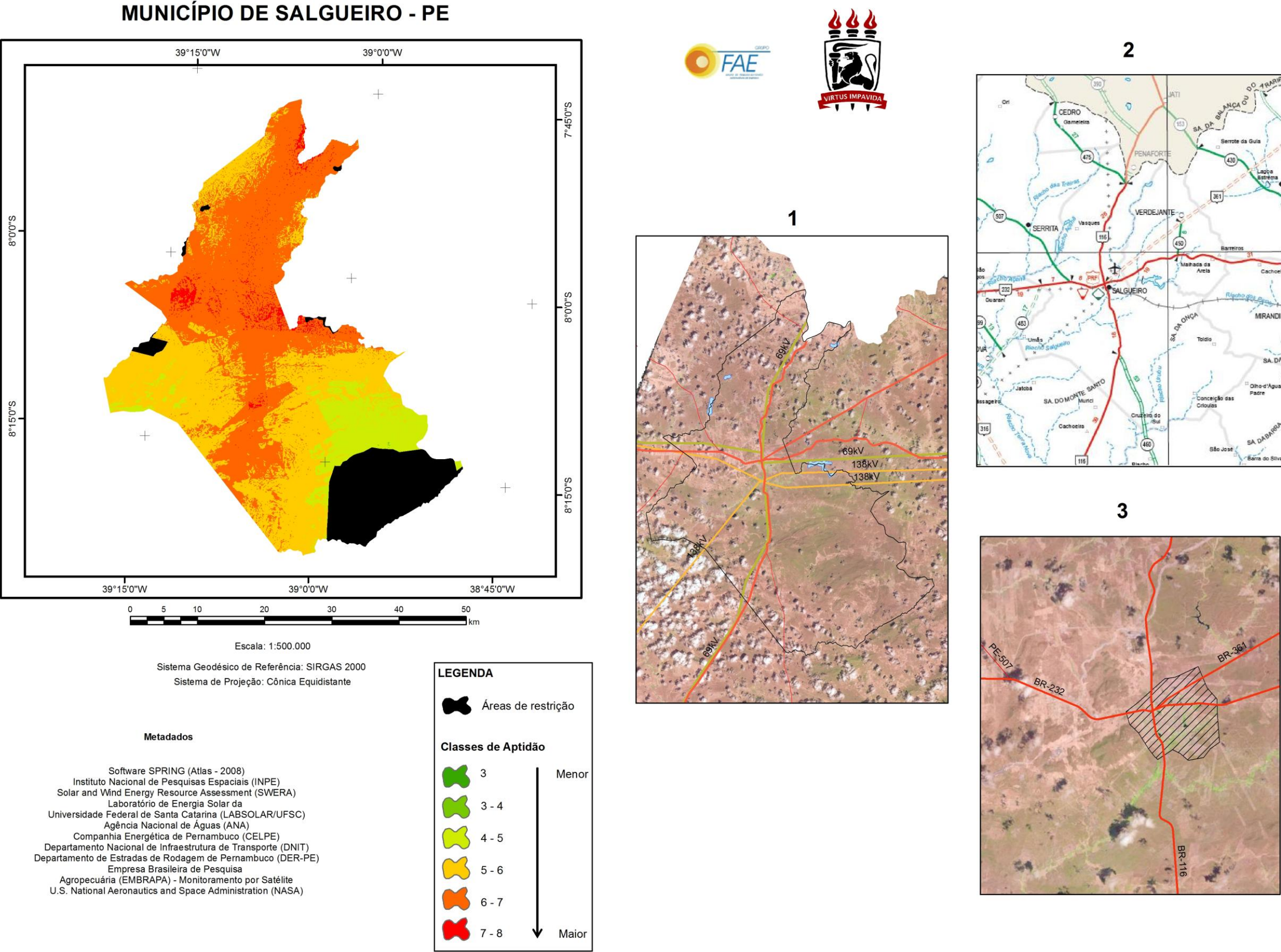
O município de Serra Talhada apresentou a mais alta aptidão nos cenários 2 e 3 deste estudo; e em Floresta, a maior aptidão foi obtida nos cenários Ponto de Partida (referência) e no Cenário 3 (onde o critério ambiental apresentou maior peso – 41% – em relação aos demais critérios do estudo). Ambos os municípios dispõem de regiões com índices de radiação solar acima de 5,0kWh/m².dia (média anual) e possuem interligação com a infraestrutura rodoviária e hídrica (rio São Francisco para Floresta, e represa de Serrinha para Serra Talhada) para a usina solar. A área disponível para a instalação de projetos (com relação às restrições do uso do solo e a proximidade com as áreas urbanas e de expansão) nos dois municípios apresentam valores de declividade menores que 5%. Mas, verifica-se que em Floresta a infraestrutura de linhas de distribuição somente é encontrada na parte Oeste do município e a aptidão agrícola dos solos é classificada como regular a restrita (que não favorece tanto a instalação dos projetos). Em Serra Talhada além da aptidão agrícola ser classificada como regular a restrita em boa parte do seu território, os valores de declividade maiores que 5% são também encontrados em muitas de suas regiões, sobretudo nas partes Norte e Leste deste município.

4.1.3 Validação do Modelo

O processo de validação do modelo para este estudo foi realizado a partir das técnicas de validação pixel a pixel e de comparação e análise visual.

Na **validação pixel a pixel**, *layers* temáticos do modelo (principais rodovias, linhas de distribuição, declividade do terreno) foram visualizados no mapa final de aptidão e também em outros documentos cartográficos para avaliar se suas posições coincidem. Já no processo de **comparação e análise visual** foram analisadas as relações entre as ponderações atribuídas aos layers e a aptidão final das áreas para verificar a consistência dos pesos no mapa final de aptidão. Tais técnicas de validação foram aplicadas para os municípios de Salgueiro e Ibimirim, que apresentaram alto potencial para a instalação das usinas solares, segundo as análises realizadas. Uma ilustração do processo de validação para o município de Salgueiro está apresentada na Figura 69.

Figura 69 – Processo de Validação do Modelo para o Município de Salgueiro – Estado de Pernambuco



Conforme ilustra a Figura 69, as regiões do município de Salgueiro que apresentaram maior aptidão para a inserção de projetos CSP no cenário Ponto de Partida foram comparadas com imagens de satélite (LANDSAT8) e com mapas rodoviários do Departamento Nacional Infraestrutura de Transporte (DNIT) para avaliar a coincidência das posições dos *layers* temáticos.

As imagens do satélite LANDSAT8 foram utilizadas para avaliar as características de uso do solo na região, analisando, por exemplo, a coincidência dos *layer* de áreas urbanas do município de Salgueiro e a existência de padrões que pudessem indicar a utilização que é dada ao solo na região.

Também foram sobrepostas às imagens, os *layers* temáticos de linhas de distribuição, corpos d'água e principais rodovias. Este último foi comparado com o Mapa Multimodal de Pernambuco do DNIT, confeccionado no ano de 2009, para verificar ou não sua coincidência.

Das análises realizadas, verificou-se não somente que a posição do *layer* temático de principais rodovias coincide com a do mapa temático (Figura 69, blocos 1, 2 e 3), mas também se observou a toponímia e elementos da vizinhança ao redor deste *layer* (localidades, riachos, entre outros) para melhorar o trabalho. Dada a resolução espacial da imagem, não foi possível checar a coincidência do *layer* de corpo d'água nem das linhas de distribuição.

Para avaliar a influência dos pesos sobre os *layers* temáticos na definição do mapa final de aptidão em Salgueiro, fez-se uma comparação dos resultados obtidos no Cenário 1 com as características gerais do município de Salgueiro.

O *layer* temático de radiação solar para o município de Salgueiro indica que a região apresenta valores acima de 5,0kWh/m².dia (médio anual) em todo seu território. Nas partes central e Sul, o valor da radiação está definida no intervalo de 5,2 a 5,7kWh/m².dia (média anual), o que também favorece a instalação das usinas solares. No cenário 1, a radiação solar foi o parâmetro com maior importância, seu peso foi de 42%;

O *layer* de declividade do terreno em Salgueiro mostra que o município dispõe de terrenos com declividades, inclusive menores que 5% na parte central e Norte do seu território. As menores declividades favorecem a instalação das usinas solares. O *layer* de declividade foi o segundo em ordem de importância, apresentando o percentual de 26%.

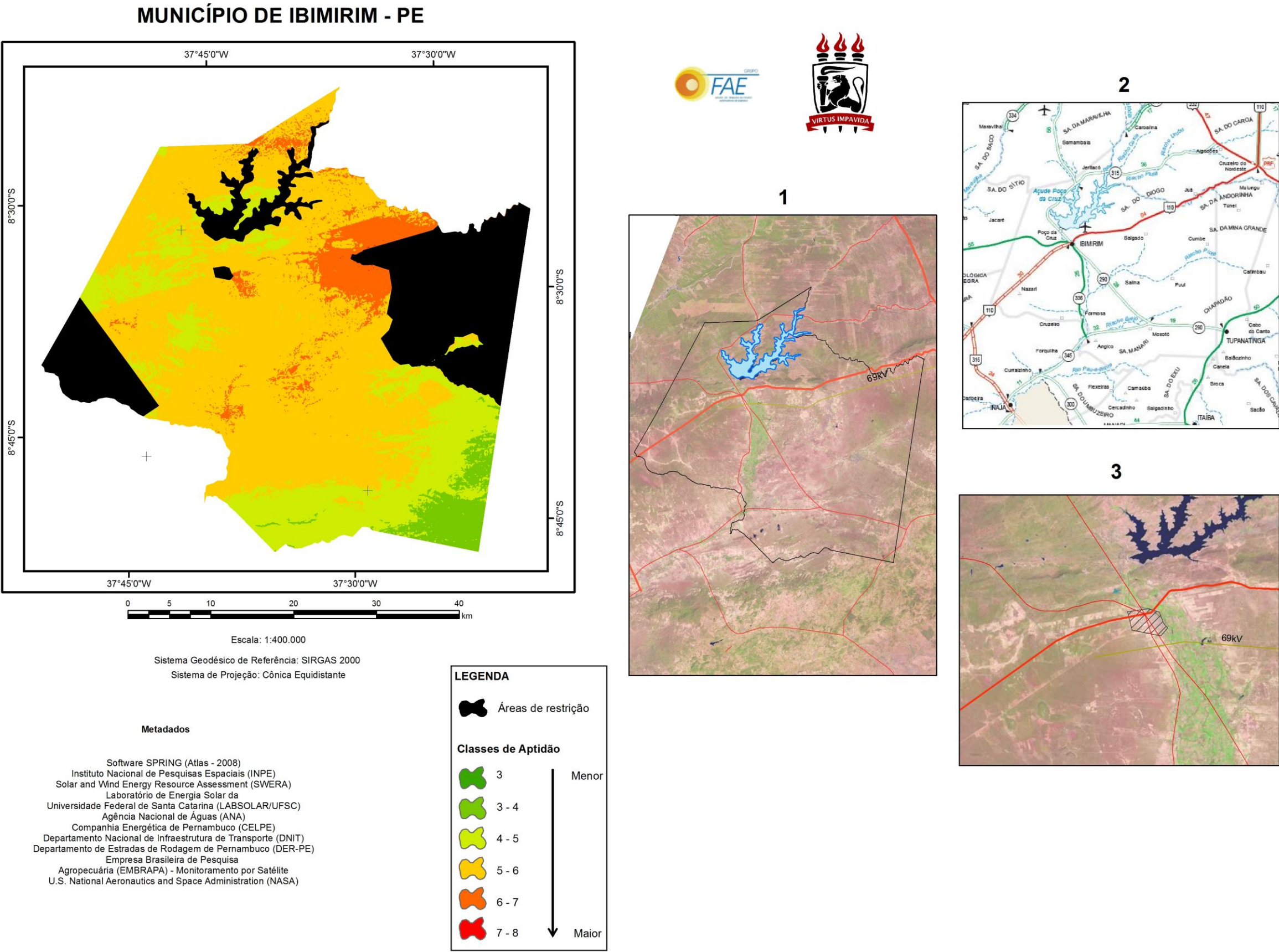
Com relação à utilização do solo, verifica-se que a maior parte do território de Salgueiro é constituída de terrenos com aptidão desaconselhável, que é a classe de aptidão agrícola que mais favorece a instalação das usinas solares no estado. Este parâmetro teve peso de 18%, terceiro em ordem de importância.

E por fim, com relação aos aspectos de infraestrutura para a interligação da usina solar verifica-se que o município dispõe de interligação elétrica (através do uso de linhas de distribuição de 69kV e 138kV, as quais estão localizadas na parte central do município); interligação hídrica (proximidade com o Açude Bela Vista, localizado na divisa com o município de Verdejante); e infraestrutura rodoviária (pelas rodovias BR-232, BR-116, PE-460), sobretudo em sua parte central. Todos os elementos de infraestrutura estão dispostos sobre a extensão territorial do município de Salgueiro, fazendo com que a proximidade para estes seja considerada favorável para a instalação das usinas solares.

Uma vez que todos os *layers* temáticos apresentaram as condições mais favoráveis para a localização das usinas solares, individualmente, verificou-se que a agregação deles, juntamente com seus respectivos pesos (*pixel* resultante do mapa final), retornou a geração de valores altos de aptidão para o propósito almejado.

Uma ilustração do processo de validação para o município de Ibimirim está mostrada na Figura 70.

Figura 70 – Processo de Validação do Modelo para o Município de Ibimirim – Estado de Pernambuco



Na Figura 70 está mostrado o processo de validação feito para as regiões do município de Ibimirim que apresentaram maior aptidão para a inserção de projetos CSP no cenário Ponto de Partida.

Tal como o processo de validação para Salgueiro, imagens do satélite LANDSAT8 foram utilizadas para avaliar as características de uso do solo na região bem como avaliar a coincidência dos *layer* de áreas urbanas para Ibimirim. Também foram sobrepostas às imagens, *layers* temáticos de linhas de distribuição, corpos d'água e principais rodovias. Mas, apenas os *layers* de principais rodovias e de corpos d'água foram comparados com o Mapa Multimodal de Pernambuco, do ano de 2009, do DNIT.

Das análises realizadas, verificou-se que a posição do *layer* temático de principais rodovias coincide com a do mapa temático (Figura 70, blocos 1, 2 e 3). Também foram analisadas as toponímias e elementos da vizinhança ao redor deste *layer* (localidades, riachos, entre outros). Dada a resolução espacial da imagem, não foi possível checar a coincidência do *layer* de corpo d'água nem das linhas de distribuição.

Para avaliar a influência dos pesos sobre os *layers* temáticos na definição do mapa final de aptidão em Ibimirim, fez-se a comparação e análise visual dos resultados obtidos no Cenário 1 com as características gerais do município.

O *layer* temático de radiação solar para o município de Ibimirim indica que a região apresenta valores acima de 5,0kWh/m².dia (médio anual) em todo seu território, o que também favorece a instalação das usinas solares. No Cenário 1, a radiação solar foi o parâmetro com maior importância, seu peso foi de 42%;

O *layer* de declividade do terreno em Ibimirim mostra que o município dispõe de terrenos com declividades, inclusive menores que 5%, valores que favorecem a instalação das usinas solares. O *layer* de declividade foi o segundo em ordem de importância, apresentando o percentual de 26%.

Com relação ao uso do solo, verifica-se que a maior parte do território de Ibimirim é constituída de terrenos com aptidão desaconselhável (parte Sul) e regular a restrita na parte Norte. Este parâmetro teve peso de 18%, terceiro em ordem de importância.

E por fim, com relação aos aspectos de infraestrutura para a interligação da usina solar verifica-se que o município dispõe de interligação elétrica (pelo uso de linhas de distribuição de 69kV, que se interligam com o Agreste Pernambucano); interligação hídrica (pelo açude Poço da Cruz, localizado na parte Norte do município); e infraestrutura rodoviária (pelas rodovias PE-312, BR-110 e PE-360, entre outros).

Com relação à proximidade com as áreas urbanas e de expansão, verifica-se que a maior disponibilidade de área é existente nas partes Sul e Leste do município. Restrições quanto ao uso do solo são encontradas, sobretudo, na parte Nordeste de seu território. Deste modo, áreas mais aptas para a instalação de usinas solares são encontradas nas partes Sul e central do município.

Uma vez que todos os *layers* temáticos apresentaram as condições mais favoráveis para a localização das usinas solares, individualmente, verificou-se que a agregação deles, juntamente com seus respectivos pesos (*pixel* resultante do mapa final), retornou a criação de valores altos de aptidão para o propósito almejado.

Todos os Mapas Temáticos resultantes da Localização pelo uso do Processo Analítico Hierárquico estão contidos no Apêndice B deste documento.

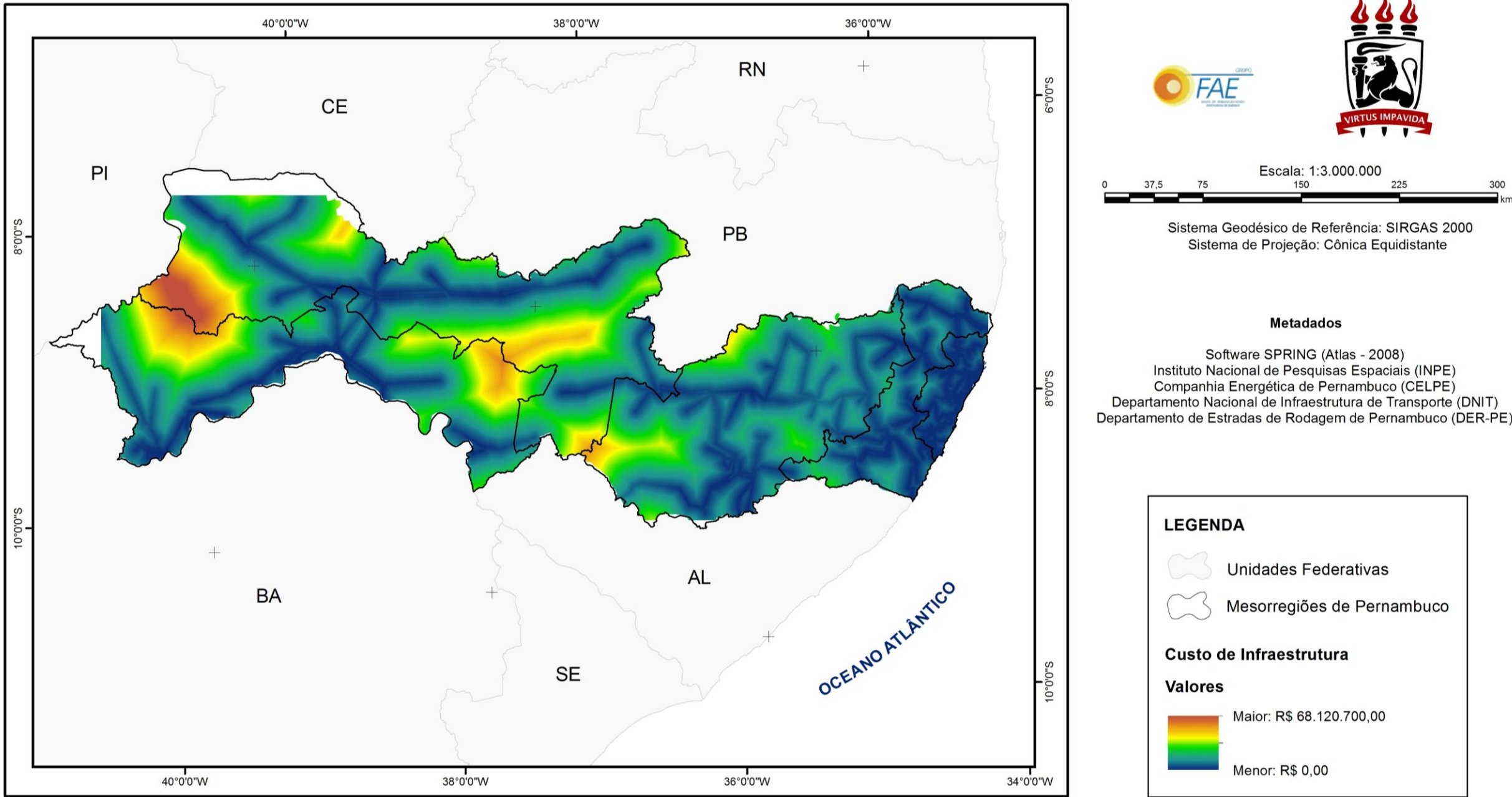
4.2 Resultados da Localização pelo Custo de Produção de Eletricidade

4.2.1 Análises e Diagnósticos

4.2.1.1 Resultado da Determinação do Custo Total de Infraestrutura da Usina Solar

O custo total de infraestrutura relaciona os gastos com as interligações elétrica, hídrica e rodoviária da usina solar. Para Pernambuco tal custo foi determinado a partir do uso dos *layers* temáticos de distância às linhas de distribuição, distâncias aos recursos hídricos e distância às principais rodovias, como também, pelo uso dos valores dos parâmetros $C_{htg/km}$ (custo, por quilômetro, para a interligação elétrica por meio das linhas de distribuição), $C_{p/km}$ (custo, por quilômetro, para a interligação hídrica) e $C_{road/km}$ (custo, por quilômetro, para a interligação rodoviária). Os resultados encontrados para Pernambuco estão apresentados no Mapa da Figura 71.

Figura 71 – Mapa do Custo Total de Infraestrutura de uma Usina Solar de 80MWe para o Estado de Pernambuco



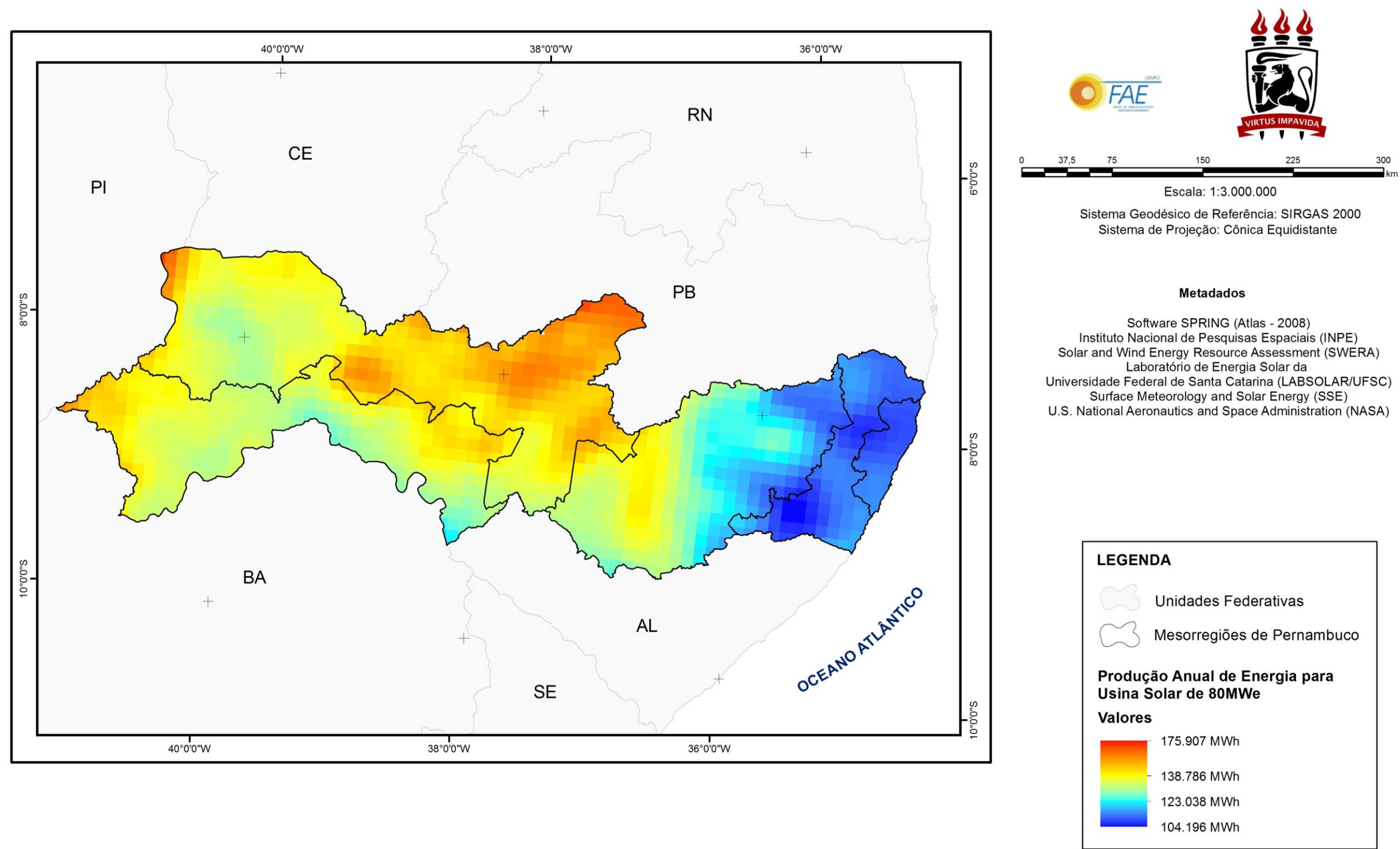
Do Mapa apresentado na Figura 71 verifica-se que os maiores custos de infraestrutura (que chegam a R\$ 68.106.900,00) estão localizados nas mesorregiões do Sertão, Agreste e São Francisco Pernambucano, sobretudo nas áreas onde há baixa intensidade de linhas de distribuição, como é o caso dos municípios de Dormentes, Filomena e Santa Cruz, situados no extremo Oeste do estado; da região limítrofe entre os municípios de Serrita e Moreilândia; de Floresta, Betânia e Custódia, situadas na parte central do estado de Pernambuco, do limite dos municípios de Manari e Itaíba; e em Carnaubeira da Penha. Por outro lado, menores valores do custo de infraestrutura, da ordem de R\$ 0,00, são encontrados nas regiões onde a presença das linhas de distribuição é marcante, e aumentam, na medida em que as distâncias para estas linhas vão se acentuando.

Importante ressaltar que a interligação elétrica (C_{htg}) é o parâmetro de maior peso na definição do custo total de infraestrutura, quando distâncias fixas são consideradas. Isso ocorre porque, para um dado valor de distância, o custo, por quilômetro, das interligações hídrica (C_p) e rodoviária (C_{road}) da usina solar representam menos de um quarto (23,5%) do custo, por quilômetro, da interligação elétrica (C_{htg}).

4.2.1.2 Resultado da Determinação da Produção Anual de Energia Elétrica

A produção anual de energia elétrica para uma usina solar de 80MWe em Pernambuco foi obtida a partir dos processos descritos no tópico 3.3.2.5. O Mapa que apresenta os valores desta produção anual, em MWh, está mostrado na Figura 72.

Figura 72 – Mapa da Produção Anual de Energia Elétrica de uma Usina Solar de 80MWe para o Estado de Pernambuco



Analisando o Mapa da Figura 72, verifica-se que a produção anual de eletricidade em Pernambuco foi superior a 100.000MWh e apresentou o valor máximo de 175.907MWh.

Os valores máximos obtidos estão localizados no Sertão Pernambucano, notadamente nas partes Noroeste e Nordeste, onde estão localizados os municípios de Flores, Carnaíba, Afogados da Ingazeira, Tabira, Solidão, Terezinha e Brejinho, por exemplo. Por outro lado, os menores valores da produção anual de eletricidade, os quais chegam a 104.196MWh, estão localizados nas mesorregiões Metropolitana do Recife, Mata Pernambucana e em trechos do Agreste Pernambucano (parte Leste).

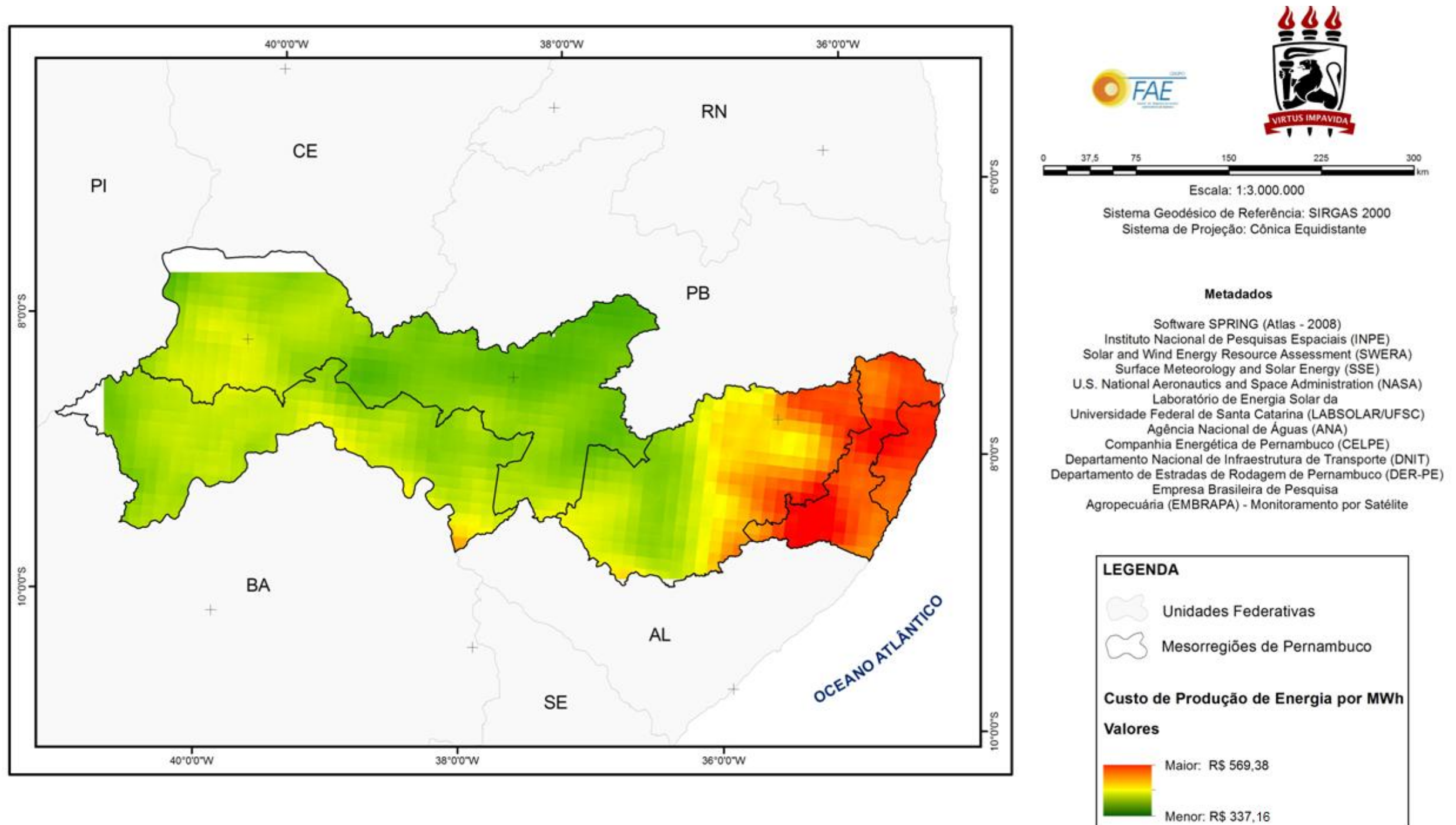
Valores superiores a 130.000MWh foram encontrados em muitas regiões do estado de Pernambuco, sobretudo nas mesorregiões do Sertão e do São Francisco Pernambucano.

4.2.1.3 Custos de Produção de Eletricidade

O custo de produção de eletricidade para o estado de Pernambuco foi obtido após o processo de modelagem da Equação 14 no SIG. Esta Equação considera os valores dos custos totais de infraestrutura da usina solar, os valores da produção anual de energia elétrica, ambos obtidos para Pernambuco, bem como parâmetros econômicos - custo total de investimento da usina solar (I_{plant}), taxa de retorno do capital (i) e tempo de vida útil da usina (n) - para definir os custos de produção de energia (em Reais por Megawatt-hora, R\$/MWh).

O Mapa do custo de produção de energia para o estado de Pernambuco está mostrado na Figura 73.

Figura 73 – Mapa do Custo de Produção de Eletricidade de uma Usina Solar de 80MWe para o Estado de Pernambuco



Da Figura 73, observa-se que os custos mais altos, da ordem de R\$ 569,38/MWh, são localizados nas mesorregiões Metropolitana do Recife e Mata Pernambucana. Também no Agreste são encontradas áreas com custos altos. Por outro lado, os menores custos de geração (R\$ 337,16/MWh) são encontrados no Sertão, sobretudo na região formada pelos municípios de Flores, Quixaba, Carnaíba, Afogados da Ingazeira, Santa Cruz da Baixa Verde, Triunfo, Ingazeira, Tabira, Solidão, São José do Egito, Santa Terezinha, Brejinho e Itapetim.

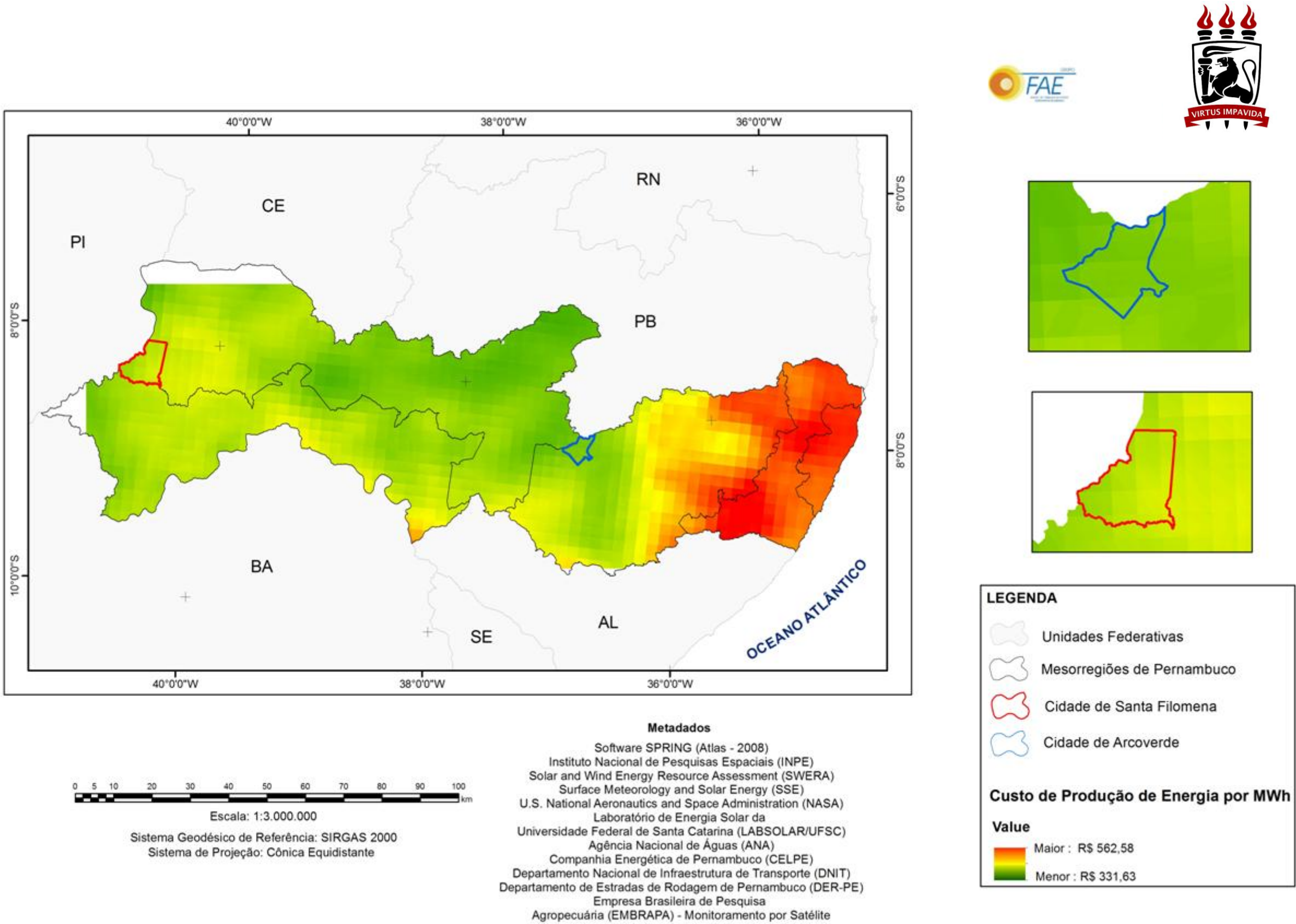
Valores intermediários do custo (da ordem de R\$ 400,00 a R\$ 450,00, por MWh) são presentes nas mesorregiões do Sertão (extremo Oeste), no Agreste (parte central) e no São Francisco Pernambucano (nos municípios que limitam-se com o Rio São Francisco).

Analisando a equação que define o custo de produção (Equação 14), verifica-se que a relação do termo C_{el} com a produção anual de energia (E_{year}) é direta, ou seja, os locais com maior produção de energia elétrica deverão apresentar os menores custos e vice-versa, se todos os outros fatores forem invariantes. De fato, analisando a Figura 72, verifica-se que os maiores valores da produção anual de energia elétrica no estado, que chegam a 175.907MWh, são encontrados na mesorregião do Sertão Pernambucano, sobretudo nas partes Nordeste e Noroeste, onde os custos por MWh chegam a R\$ 337,16. Por outro lado, os menores valores de produção anual, que chegam a 104.196MWh, são encontrados nas mesorregiões Metropolitana do Recife, Mata Pernambucana e em trechos do Agreste Pernambucano (parte Leste), onde os custos de produção são da ordem de R\$569,38/MWh.

Analisando novamente a equação do custo de produção de eletricidade (Equação 14), mas relacionando o parâmetro C_{el} com o custo total de infraestrutura da usina solar (I_{inf}), se verifica que quanto maior o custo da infraestrutura, para um dado valor de produção de energia, maior será o custo de produção de eletricidade.

Tomando como exemplo os municípios de Arcoverde e Santa Filomena, situados no Sertão Pernambucano, se observa que os valores de produção anual de energia mostrados na Figura 72, em ambos os municípios, estão acima de 130.000MWh e são similares, porém os custos de produção da energia elétrica (Figura 73) são diferenciados, tendendo a R\$ 337,16/MWh em Arcoverde e a valores intermediários (R\$ 400,00/MWh) em Santa Filomena. Isto ocorre porque os custos de infraestrutura em Arcoverde são muito próximos a zero ao passo que em Santa Filomena os custos de infraestrutura chegam a R\$ 68.106.900,00. Considerando um cenário onde os gastos com a infraestrutura não fosse incluídos, conforme mostrado na Figura 74, o custo de produção nesses dois municípios seria bem próximo, na ordem de R\$ 331,63MWh.

Figura 74 – Mapa do Custo de Produção de Eletricidade de uma Usina Solar de 80MWe para o Estado de Pernambuco
(Desconsiderando o Custo Total de Infraestrutura)



No Mapa da Figura 74 estão apresentados os custos de produção de eletricidade em Pernambuco obtidos a partir da desconsideração dos gastos de infraestrutura da usina solar. Deste Mapa verifica-se que o custo de produção da energia está definido no intervalo de R\$ 331,63/MWh a R\$ 562,68/MWh. Os custos mais altos estão igualmente localizados nas mesorregiões Metropolitana do Recife, Mata Pernambucana e no Agreste Pernambucano e os custos mais baixos ainda são encontrados no Sertão Pernambucano (especialmente, na parte Nordeste) e em Afrânio, na mesorregião do São Francisco Pernambucano.

4.2.2 Identificação das Áreas Promissoras

4.2.2.1 Análises de Disponibilidade de Área

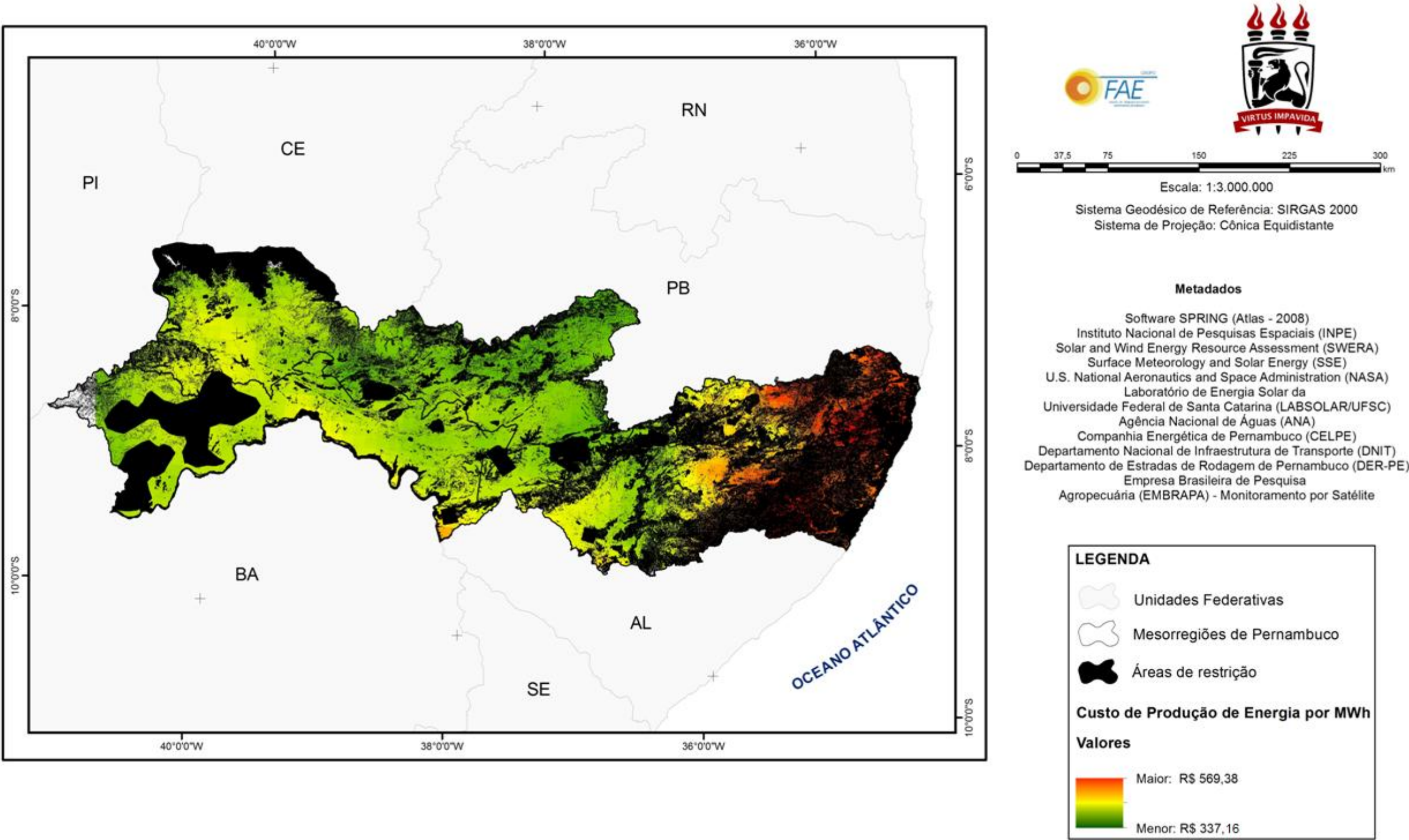
As análises de disponibilidade de área tiveram por objetivo extrair do modelo as regiões com características desfavoráveis a instalação da usina solar (áreas de restrição) bem como observar as questões de área mínima para o desenvolvimento dos projetos.

No estudo de localização pelo método do custo de eletricidade, as áreas de restrição compreenderam os seguintes ambientes:

- a) Unidades de Conservação de Uso Sustentável e de Proteção Integral (de âmbito federal e estadual);
- b) Remanescentes Florestais da Mata Atlântica;
- c) Territórios Indígenas e Quilombolas;
- d) Áreas de Alta Aptidão Agrícola;
- e) Áreas Urbanas e de Expansão Urbana dos municípios com população acima de 25.000 habitantes;
- f) Corpos d'Água;
- g) As regiões de Pernambuco com declividades maiores que 5%;

O Mapa que ilustra as informações sobrepostas de custo de produção de energia e áreas de restrição definidas para esta metodologia está apresentado na Figura 75 (Mapa do Custo de Produção de Energia para uma Usina Solar de 80MWe com Áreas de Restrição para o Estado de Pernambuco).

Figura 75 – Mapa do Custo de Produção de Eletricidade de uma Usina Solar de 80MWe com Áreas de Restrição para o Estado de Pernambuco



Do Mapa apresentado na Figura 75, verifica-se que as maiores disponibilidades de área para a inserção dos projetos são localizadas nas mesorregiões do Sertão e do São Francisco Pernambucano. Por outro lado, nas mesorregiões Metropolitana do Recife e Mata Pernambucana se constata menor disponibilidade de área que se deve, sobretudo, a existência das Unidades de Conservação e Remanescentes Florestais da Mata Atlântica, às áreas urbanas e de expansão urbana, e à localização de terrenos mais acentuados (declividades acima de 5%). A disponibilidade de área total para a instalação de projetos CSP em Pernambuco é de 48.908,27km².

Com relação à disponibilidade de área mínima para a execução dos projetos, se observa que as usinas de coletores parabólicos têm demanda por áreas relativamente grandes. Uma usina solar de 80MW operando sem armazenadores térmicos, por exemplo, requer uma área de 500.000m², aproximadamente, para dispor o arranjo de coletores. Como o fator de escala derivado das experiências de construção de centrais solares mostra que é vantajoso instalar usinas adjacentes, a disponibilidade mínima de área poderia ser de 2 a 8km² para a instalação sucessiva e modular destas centrais, (TIBA et al., 2012).

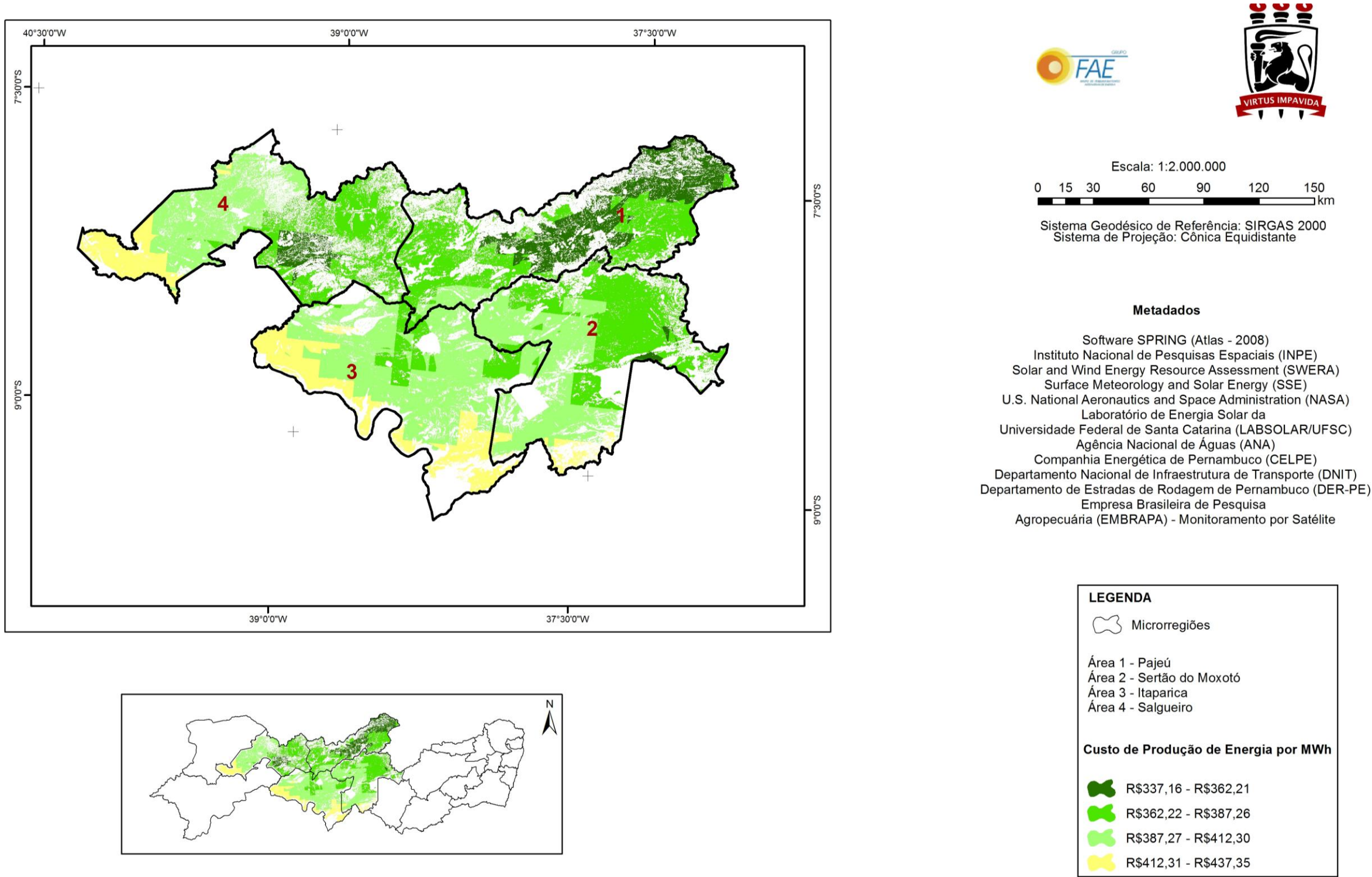
Os resultados da aplicação das análises de disponibilidade de área para o estado de Pernambuco estão mostrados na seção a seguir.

4.2.2.2 Identificação das Áreas Aptas

A identificação das áreas aptas à instalação das usinas solares em Pernambuco foi feita considerando a disponibilidade de área para a inserção dos projetos, os menores custos de produção de energia, a maior produção anual de eletricidade e as menores distâncias aos elementos de infraestrutura. Para auxiliar esta identificação foram utilizados o *layer* de microrregiões do IBGE (subdivisões das mesorregiões) e o recurso *Reclassify* do *software* ArcGIS 10.1.

Por meio do uso do recurso *Reclassify*, o *layer* de custo de produção de energia foi representado em 9 classes, de intervalos iguais, para a seleção das áreas. As quatro classes que apresentaram os menores custos de produção de energia (e apresentaram também os maiores valores de produção anual de energia e as menores distâncias para os elementos de infraestrutura) foram relacionadas com as áreas de restrição para a identificação das áreas aptas. O resultado desta análise espacial está mostrado no Mapa da Figura 76.

Figura 76 – Mapa das Áreas com Potencial de Instalação de Usinas Solares Termoeletricas de 80MWe para o Estado de Pernambuco



Do Mapa da Figura 76, observa-se que os ambientes com maior potencial de instalação das usinas solares no estado de Pernambuco são os seguintes:

- **Ambiente 1 – Custos de Produção da ordem de R\$ 337,16 a R\$ 362,21:** localizados nas microrregiões do Pajeú, Sertão do Moxotó e em Salgueiro.
- **Ambiente 2 – Custos de Produção da ordem de R\$ 362,22 a R\$ 387,26:** localizados nas microrregiões do Pajeú, Sertão do Moxotó, Salgueiro e Itaparica.
- **Ambiente 3 – Custos de Produção da ordem de R\$ 387,27 a R\$ 412,30:** também localizados nas microrregiões do Pajeú, Sertão do Moxotó, Salgueiro e Itaparica.
- **Ambiente 4 – Custos de Produção da ordem de R\$ 412,31 a R\$ 437,35:** localizados nas microrregiões do Pajeú, Sertão do Moxotó e Itaparica.

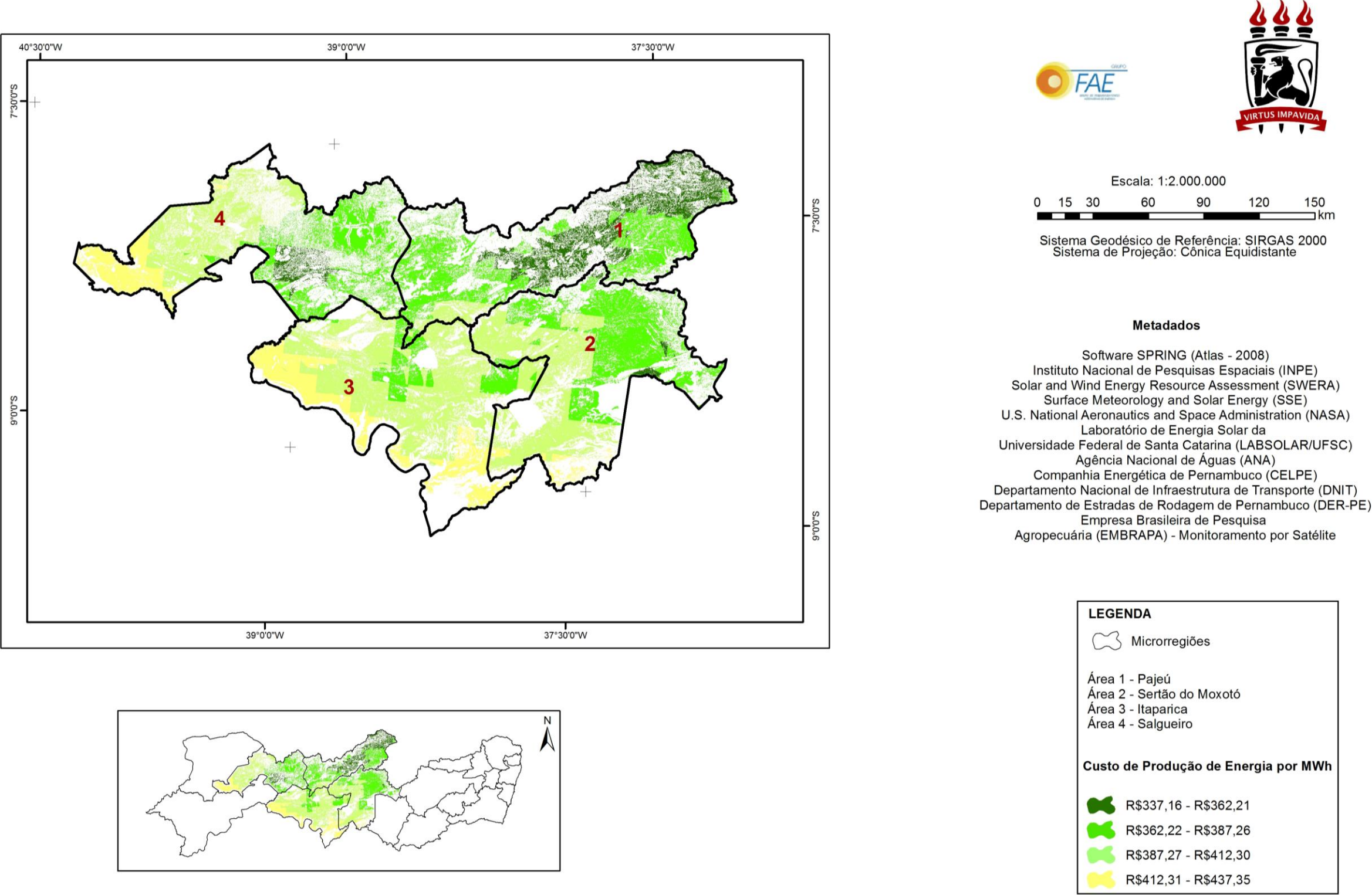
A disponibilidade total de área para a inserção dos projetos em cada um dos ambientes promissores está mostrada na Tabela 24.

Tabela 24 – Área Total Disponível para a Inserção de Projetos CSP em Pernambuco.

Ambiente	Área (km²)	Porcentagem em relação à Área do estado de Pernambuco
Ambiente 1	2.453,85	2,50%
Ambiente 2	8.917,33	9,08%
Ambiente 3	9.678,34	9,86%
Ambiente 4	2.896,30	2,95%

Uma vez definidos os ambientes mais promissores para a instalação das usinas solares considerando declividades maiores que 5% também como área de restrição, fez-se uma nova análise de identificação de áreas, incluindo como restrição os terrenos com declividade maior que 2%. O resultado desta nova análise está apresentado no Mapa da Figura 77.

**Figura 77 – Mapa das Áreas com Potencial de Instalação de Usinas Solares Termoeletricas de 80MWe para o Estado de Pernambuco
(Considerando Terrenos com Declividade maior que 2% como Área de Restrição).**



Analisando o Mapa da Figura 77, onde declividades maiores que 2% são consideradas como área de restrição, observa-se que os ambientes mais promissores para a inserção da tecnologia são ainda as microrregiões do Pajeú, Sertão do Moxotó, Salgueiro e Itaparica. Entretanto, a disponibilidade de área para a implantação é menor (Tabela 25).

Tabela 25 – Área Total Disponível para a Inserção de Projetos CSP em Pernambuco (Considerando Terrenos com Declividade maior que 2% como Área de Restrição).

Ambiente	Área (km²)	Porcentagem em relação à Área do estado de Pernambuco
Ambiente 1	1.732,25	1,76%
Ambiente 2	6.910,98	7,04%
Ambiente 3	7.984,06	8,13%
Ambiente 4	2.487,05	2,53%

Fazendo uma análise comparativa dos custos da eletricidade gerada pela tecnologia CSP em Pernambuco (da ordem de R\$ 337,16 para cada MWh gerado) com aqueles gerados por outras renováveis no Brasil (Tabela 26) se verifica que os custos da tecnologia CSP são ainda elevados, no entanto, estão em conformidade quanto ao esperado para sua inserção no mercado brasileiro.

Tabela 26 – Preço Médio da Eletricidade Gerada por Outras Fontes Renováveis de Energia no Brasil.

Fonte de Geração	Custo de Geração (R\$/MWh)
Pequena Central Hidrelétrica	182,09
Usina Eólica	160,74
Biomassa	225,80

Preço Médio da Eletricidade Gerada por Outras Fontes Renováveis de Energia no Brasil de acordo com os Leilões N°06/2014 e N° 08/2014 da ANEEL. Fonte: ANEEL (2014).

Todos os Mapas Temáticos resultantes da Localização pelo uso do Custo de Produção de Eletricidade estão contidos no Apêndice B.

5. CONCLUSÃO

A presente tese apresentou duas metodologias distintas e macroespaciais para a localização de usinas solares termoeletricas de coletores cilindricos parabólicos de 80MWe no estado de Pernambuco: a Metodologia baseada no Processo Analítico Hierárquico (Método AHP) e a Metodologia do Custo de Produção de Eletricidade.

A localização baseada no **Método AHP** se mostrou muito adequada no fornecimento de subsídios voltados à identificação de áreas potenciais para a inserção de usinas solares termoeletricas em Pernambuco. Com base nas análises realizadas, confirmou-se que o Estado apresenta alto potencial para o desenvolvimento dessa tecnologia, sobretudo na mesorregião do Sertão Pernambucano, onde foram encontrados os ambientes mais aptos à instalação, nos cenários avaliados no estudo.

A avaliação do Cenário Ponto de Partida (cenário de referência do estudo, onde pesos não foram considerados), por exemplo, mostrou que vários ambientes do Sertão, Agreste e do São Francisco Pernambucano apresentaram alto potencial para a instalação da tecnologia solar termoeletrica. Contudo, quando os pesos foram considerados, sobretudo nos Cenários 1 e 2 onde a radiação solar apresentou maior ponderação (em geral, maior que 40%) frente aos demais critérios do estudo, as áreas mais aptas foram deslocadas para o Sertão, especialmente para sua parte central (municípios de Salgueiro e Verdejante), parte Nordeste (municípios de Brejinho, Santa Terezinha, Itapetim, Flores e São José do Egito) e parte Sudeste (municípios de Sertânia e Ibimirim), onde são encontrados os mais altos índices de radiação solar direta do estado.

No Cenário 3, onde o critério ambiental apresentou o mais alto percentual em relação aos demais critérios do estudo, os ambientes com maior aptidão para a implantação das usinas solares foram encontrados numa vasta área de Pernambuco, caracterizada pela apresentação da menor classe de aptidão agrícola dos solos (classe desaconselhável). Esta vasta área do estado abrange as mesorregiões do Sertão, Agreste e do São Francisco Pernambucano. Fazendo um comparativo com o Cenário Ponto de Partida, verificou-se que as áreas de maior potencial no Cenário 3 exibiram um maior quantitativo de área disponível para a instalação, abrangendo regiões que no cenário Ponto de Partida obtiveram menor potencial de inserção (classe de aptidão mais baixa).

As validações realizadas no modelo visaram averiguar se o sistema desenvolvido com o auxílio do SIG correspondia, de fato, a uma representação pertinente do mundo real e foram realizadas para os municípios de Salgueiro e Ibimirim, localizados no Sertão Pernambucano. Os processos aplicados compreenderam as técnicas de validação pixel a pixel e a comparação e análise visual. Tais processos demonstraram que o modelo usado atendeu ao objetivo proposto uma vez que foram confirmadas a posição espacial e outras informações relevantes de alguns *layers* temáticos com base nos Documentos Cartográficos disponíveis da região. Os processos de validação também evidenciaram a consistência presente entre as ponderações atribuídas aos *layers* temáticos individualmente e o Mapa final de aptidão das áreas, onde os *layers* temáticos foram agregados com seus respectivos pesos.

Considerando as análises realizadas na aplicação do **Método do Custo de Produção de Eletricidade**, confirmou-se também que a mesorregião do Sertão Pernambucano apresenta grande potencial para a implantação das usinas solares termoeletricas, principalmente, nas microrregiões do Pajeú, Sertão do Moxotó e Salgueiro. Nestas microrregiões puderam-se encontrar ambientes com disponibilidade de área para a inserção dos projetos e fatores que propiciam o desenvolvimento da tecnologia como, por exemplo, o mais alto valor de geração de energia elétrica do Estado e os menores custos de geração.

Os menores custos de geração de eletricidade (da ordem de R\$ 337,16/MWh) foram encontrados, especialmente, na microrregião do Pajeú. Análises realizadas mostraram que este custo de geração poderá ainda ser mais baixo (da ordem de R\$331,63/MWh) se os elementos de infraestrutura elétrica, rodoviária e hídrica da usina solar forem desconsiderados.

Considerando o custo da eletricidade gerada pela tecnologia CSP em Pernambuco com aquele gerado por outras renováveis no Brasil, por exemplo, a hidroeletricidade (PCH) que foi da ordem de 182,09MWh segundo os Leilões N°06/2014 e N° 08/2014 da ANEEL, se verifica que os custos da tecnologia CSP são ainda elevados, no entanto, estão em conformidade quanto ao esperado para sua inserção no mercado brasileiro.

6. PERSPECTIVAS

De modo geral, as duas abordagens realizadas para Pernambuco mostraram resultados consistentes e identificaram um potencial promissor para o desenvolvimento de projetos CSP de grande porte. Este potencial deverá ser avaliado detalhadamente e, neste sentido, algumas perspectivas para novas pesquisas são:

- Realização de novas análises com dados da radiação solar direta normal incidente, medidos por pelo menos cinco anos;
- Análises da influência das variações mensais e ou sazonais do recurso solar (radiação solar direta normal), da temperatura e do efeito dos ventos na determinação da geração de energia elétrica e, conseqüentemente, na determinação do custo final de produção de eletricidade;
- Avaliação da aptidão das áreas sem a consideração do aspecto disponibilidade hídrica para a usina solar tanto no método do custo de geração de eletricidade quanto no uso do método AHP, em virtude da possibilidade de utilização de sistemas de resfriamento a seco nas usinas solares;
- Análises da formação das ilhas de calor em torno da usina solar e suas conseqüências para o meio ambiente e o bem estar da população;
- Realização de estudos para avaliar o potencial solar-eólico em Pernambuco visando à instalação de complexos híbridos, em virtude da complementaridade existente entre os aproveitamentos solar e eólico para a geração de eletricidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCÂNTARA, L. A.; SÁ, L. A. C. M. **Estruturação de Base de Dados Espaciais para Sistema de Geoinformação de Suporte à Gestão de Recursos Hídricos Subterrâneos na Região Metropolitana do Recife**. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Maceió, 2011.

ARÁN CARRIÓN, J.; ESPÍN ESTRELLA A, F.; AZNAR DOLS F.; ZAMORANO TORO, M.; RODRÍGUEZ, M.; RAMOS RIDAO A. **Environmental Decision-Support Systems for Evaluating the Carrying Capacity of Land Areas: Optimal Sites Selection for Grid-Connected Photovoltaic Power Plants**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.12, pp. 2358–2380. 2008.

ARVIZU, D.; BALAYA, P.; CABEZA, L. 2011. **Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation SRREN, Chapter 3. Direct Solar Energy**. Cambridge and New York: IPCC. Disponível em: <<http://srren.ipcc-wg3.de/>>. Acesso em: 13 mai. 2013.

ATIENZA, G. **Instrumentación Solarimétrica**. Centro de Investigaciones de Recursos Naturales, Argentina: Instituto de Clima y Agua. 1993.

AZEVEDO, V. W. B.; TIBA, C. **Location of Large-Scale Concentrating Solar Power Plants in Northeast Brazil**. Journal of Geographic Information System, pp. 452-470, 2013. <http://dx.doi.org/10.4236/jgis.2013.55043>.

BARBOSA, C. C. F. **Álgebra de Mapas e suas Aplicações em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento**. São José dos Campos: INPE, 1999. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 1999.

BURGI, A. S. **Avaliação do Potencial Técnico de Geração Elétrica Termossolar no Brasil a partir de Modelagem em SIG e Simulação de Plantas Virtuais**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2005. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

BURROUGH, P.A.; MCDONNEL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford, Clarendon Press, 311p, 1998.

BRAVO, J. D.; CASALS, X. G.; PASCUA, I. P. **GIS Approach to the Definition of Capacity and Generation Ceilings of Renewable Energy Technologies**. Energy Policy 35, pp. 4879-4892. 2007.

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, pp. 1-12. 2001.

CAMARA, G.; CASANOVA, MA.; HERMELY, AS.; MAGALHÃES, GC.; MEDEIROS, MB. **Anatomia de Sistemas de Informações Geográficas**. Cartgraf LTDA, 1996.

CAVALCANTI, E. S. C.; PETTI, A. C. G. **Assessment of SEGS-Like Power Plants for the Brazilian Northeast Region**. Journal of Solar Energy Engineering, v.130. 2008.

CHARABI Y, GASTLI A. **PV Suitability Analysis Using Gis-based Spatial Fuzzy Multi-criteria Evaluation**. Renewable energy, v. 36, pp. 2556-2561. 2011.

COELHO, G. B. **Análise e Simulação do Processo em Transformação de Chuva em Vazão com Suporte de Sistemas de Informações Geográficas**. Recife: UFPE, 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) – Departamento de Engenharia Cartográfica, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2006.

DAHLE D.; ELLIOTT, D.; HEIMILLER, D.; MEHOS, M.; ROBICHAUD, R.; SCHWARTZ, M.; STAFFORD, B.; WALKER, A. **Assessing the Potential for Renewable Energy Development on DOE Legacy Management Lands**. In: NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). 2008.

DUDLEY, V.; KOLB, G.J.; MAHONEY, A.R.; MANCINI, T.R.; MATTHEWS, C.W.; SLOAN, M.; KEARNEY, D. **Test Results: SEGS LS-2 Solar Collector**. Sandia National Laboratories, SAND94-1884. December, 1994.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W, A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. United States: A Wiley Interscience, 1991.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. John Wiley & Sons, 3rd edition, USA. 2006.

EASTMAN, J. R. JIANG, H. **Fuzzy Measures in Multi-Criteria Evaluation**. Proceedings, Second International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Studies. Fort Collins, GIS World Inc.: 527–34. 1996.

EPE, 2014. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2014: Ano base 2013**, s.l.: Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, Brasil.

EPE, 2015. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2015: Ano base 2014 (Resumo)**, s.l.: Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, Brasil.

ESRI, 2015. Environmental Systems Research Institute. Help on line. Disponível em <<http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//009z000000rq000000>>. Acesso em: 15 mar. 2015.

FERNANDES, R. T. **Supervisão de um Sistema Híbrido eólico/diesel usando Lógica Fuzzy**. Campo Grande: UFMS, 2005. Mestrado (Dissertação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul. Campo Grande, 2005.

FISCHER, M. M.; SCHOLTEN, H. J.; UNWIN, D., 1996. **Geographic Information Systems, Spatial Data Analysis and Spatial Modelling: an Introduction**. In: FISCHER, M. M.; SCHOLTEN, H. J.; UNWIN, D., eds., *Spatial analysis perspectives in GIS*, Taylor and Francis.

FLABEG G, H. **Solar Mirrors for CSP and CPV. Product Data Sheet**. Disponível em: <www.flabeg.com>. Acesso em: 17 nov. 2013.

FLURI, T. P., 2009. **The Potential of Concentrating Solar Power in South Africa**. *Energy Policy* 37, pp. 5075-5080.

FRAIDENRAICH, N.; LYRA, F., **Energia Solar – Fundamentos e Tecnologias de Conversão Heliotermoeletrica e Fotovoltaica**. Editora Universitária – UFPE, 1995.

FRAIDENRAICH, N, MACEDO, N. G. L., TIBA, C. **Plano Nacional de Desenvolvimento das Tecnologias Solar Térmica de Médias e Altas Temperaturas - Documento Base**, Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT), Brasília, 2009.

GARCÍA, I, L.; ÁLVAREZ, J. L.; BLANCO, D. **Performance Model for Parabolic Trough Solar Thermal Power Plants with Thermal Storage: Comparison to Operating Plant Data**. *Solar Energy*, v.85, pp. 2443 – 2460. 2011.

GOODCHILD, M. F.; HAINING, R. P. **GIS and Spatial Data Analysis: Covering Perspectives**. *Papers in Regional Science*, v. 83, pp. 363-385, 2004.

GUIMARÃES, A. P. C. **Caracterização de Localidades do Semi-Árido para Implantação de um Sistema Piloto Heliotérmico de Geração Elétrica**. In: III Congresso Brasileiro de Energia Solar. Belém, 2010.

IBGE, 1990. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Divisão Regional do Brasil em Mesorregiões e Microrregiões Geográficas**. Volume I. Diretoria de Geociências – DGC, Departamento de Geografia – DEGEO, 1990. Disponível em: <http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/monografias/GEBIS%20-%20RJ/DRB/Divisao%20regional_v01.pdf>. 1990>. Acesso em: 17 out. 2014.

IBGE, 2010. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico de 2010**. 2010. Disponível em: <<http://censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 17 out. 2014.

IEA, 2008. **Energy Technology Perspectives. Scenarios and Strategies to 2050**. s.l.: International Energy Agency. Paris, França. 2008.

IEA, 2014. **Technology Roadmap - Solar Thermal Electricity**. s.l.: International Energy Agency. Paris, França. 2014.

IRENA, 2013. **Concentrating Solar Power. Technology Brief**. s.l.: International Renewable Energy Agency and International Energy Agency - Energy Technology Systems Analysis Programme - ETSAP.

JUNGES, L. C. D. **Introdução a Lógica Fuzzy**. Departamento de Automação de Sistemas Industriais Inteligentes, 2006.

KALOGIROU, S. **Solar Energy Engineering: Processes and Systems**. Elsevier. Estados Unidos, 2009.

KEENEY, R.L., RAIFFA, H. **Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs**. New York: John Wiley & Sons, 589 p. 1976.

KELLY, B. **Nexant Parabolic Trough Solar Power Plant Systems Analysis, Task 2: Comparison of Wet and Dry Rankine Cycle Heat Rejection**. In: NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). 2006.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. 2005. **Geographic Information Systems and Science**. John Wiley & Sons Ltd, Toronto. 2nd Edition, 2005.

MEDEIROS, J. S. **Bancos de Dados Geográficos e Redes Neurais Artificiais: Tecnologias de Apoio à Gestão do Território**. Tese (Doutorado) – Departamento de Geografia. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1997.

MENNIS, J.; VIGER, R.; TOMLIN, C. D. **Cubic Map Algebra Functions for Spatio-Temporal Analysis**. Cartography and Geographic Information Science, v. 32, n. 1, pp. 17-32, 2005.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevô**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 24 set. 2014.

MORIN, G.; DERSCH, J.; PLATZER, W.; ECK, M.; HARBELE, A. **Comparison of Linear Fresnel and Parabolic Trough Collector Power Plants**. Solar Energy, v. 86, pp. 1-12. 2012.

MUSSONE, L.; SALA, G. **A Method to Evaluate Vehicular Accident Probability by Using Self Organizing Maps**. CUPUM – 7th International Computers in Urban Planning and Urban Management Conference, University of Hawaii at Monoa Honolulu, Hawaii, USA. 2001.

PARREIRAS, R. O. **Algoritmos Evolucionários e Técnicas de Tomada de Decisão em Análise Multicritério**. BELO HORIZONTE: UFMG, 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2006.

PATNODE, A. M. **Simulation and Performance Evaluation of Parabolic Trough Solar Power Plants**. Master of Science. 271 p. Mechanical Engineering. University of Wisconsin-Madison. Madison, Estados Unidos. 2006.

PITCHUMANI, R. **Sunshot Concentrating Solar Power Program Update**. Program Review Meeting. U.S. Department of Energy. April, 2013.

POZZOBON, E. **Utilización de un Sistema de Información Geográfica para la Selección y Priorización de Áreas a Reforestar en los Alrededores de la Ciudad de Mérida, Venezuela**. Revista Forest Venezuela, v. 47, pp. 61-72. 2003.

RAGHEB, M. **Historical Perspective**. University of Illinois at Urbana-Champaign, Estados Unidos. 2011.

REN21, 2015. **Renewables 2015 – Global Status Report**, s.l.: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Paris, REN21 Secretariat. ISBN 978-3-9815934-6-4.

RIBEIRO, G. P. **Tecnologias Digitais de Geoprocessamento no Suporte à Análise Espaço-Temporal em Ambiente Costeiro**. Niterói: UFFL, 2005. Tese (Doutorado em Planejamento e Ordenamento Territorial e Ambiental) – Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2005.

RICHTS, C. **A Comparative Analysis of CSP and PV Utilization until 2020**. Thesis Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, University of Kassel, 2012.

ROLIM, M. M. **Modelagem Analítica de Geração Solar Térmica de Eletricidade com Concentradores Parabólicos de Foco Linear**. Recife: UFPE, 2007. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2007.

ROY, B. **Méthodologie Multicritère D'aide à la Décision**, Paris: Economica, 423 p. 1985

RUHOFF, A. L.; SOUZA, B. S. P.; GIOTTO, E.; PEREIRA, R. S. **Lógica Fuzzy e Zoneamento ambiental da Bacia do Arroio Grande**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 2004, Goiânia. Anais... São José dos Campos: INPE, 2005. p. 2355-2362. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. Disponível em: <<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.18>>. Acesso em: 20 mai. 2014.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation**. McGraw-Hill, New York, NY, 437 pp. 1980.

SAATY, T. L. **Método de Análise Hierárquica**, São Paulo: Makron Books, 367 p. 1991.

SÁNCHEZ-LOZANO, J. M; TERUEL-SOLANO, J; STO-ELVIRA, P. L; GARCÍA-CASCALES, M. S. **Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods for the Evaluation of Solar Farms Locations: Case Study in South-eastern Spain.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.24, pp. 544-556. 2013.

SÁNCHEZ-LOZANO, J. M; ANTUNES, C. H.; GARCÍA-CASCALES, M. S; DIAS, L. C. **GIS-based Photovoltaic Solar Farms Site Selection using ELECTRE-TRI: Evaluation the Case for Torre Pacheco, Murcia, Southeast of Spain.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.66, pp. 478-494. 2014.

SHENCK, H.; ECK, M. **Yield Analysis for a Parabolic Trough Power Plants – A Basic Approach,** Stuttgart. 2012.

SILVEIRA, T. A.; CARNEIRO, A. F. T.; PORTUGAL, J. L. **Estruturação de Bases Cartográficas para Sistemas de Informação Geográfica (SIG).** In. Anais do II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, II SIMGEO (CD-ROM). Recife-PE. Setembro, 2008.

SOLANGI, K. H.; ISLAM, M. R.; SAIDUR, R.; RAHIM, N. A.; FAYAZ, H. **A Review on Global Solar Energy Policy.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, n. 4, p. 2149-2163, 2011.

SOLAR TROUGH, 2013. **Solar Parabolic Trough.** Disponível em: <http://www.solarpaces.org/CSP_Technology/docs/solar_trough.pdf> Acesso 20 de novembro de 2013.

TIBA, C.; REIS, R. J. R.; COSTA, J. C. E.; AZEVÊDO, V. W. B.; ABREU, J. F.; ALVES, M. A. S.; GUIMARÃES, D. P.; PORTO, M. A. D. **Siting Study of Solar Thermoelectric Plants in the State of Minas Gerais.** Journal of Geographic Information System, pp. 423-493, 2014. <http://dx.doi.org/10.4236/jgis.2014.65037>.

TIBA, C.; REIS, R. J. R.; COSTA, J. C. E.; AZEVÊDO, V. W. B.; ABREU, J. F.; ALVES, M. A. S.; GUIMARÃES, D. P.; PORTO, M. A. D. **Metodologias para a Elaboração de Mapas de Radiação Solar para Minas Gerais.** IV Congresso Brasileiro de Energia Solar – CBENS. Recife, 2014.

TIBA, C.; FRAIDENHAICH, N.; BARBOSA, E. M. S. B.; CANDEIAS, A. L. B.; NETO, P. B. C.; FILHO, J. B. M. **SIGA SOL 1.0 (Sistema de Informação Geográfica Aplicada à Energia Solar). Parte I: Descrição Geral e Metodologia.** ANAIS DO II CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR E III CONFERÊNCIA REGIONAL LATINO-AMERICANA DA ISES. Florianópolis. 18 a 21 de novembro. 2008.

TURCHI, C. **Parabolic Trough Reference Plant for Cost Modeling with the Solar Advisor Model (SAM).** s.l.: National Renewable Energy Laboratory - NREL. Technical Report NREL/TP-550-47605. Colorado, Estados Unidos. 2010.

TREVIZANO, W. A. **Ferramenta Computacional Multiusuário para Auxílio à Tomada de Decisão Multicritério**. Campos dos Goytacazes: UENF, 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Estadual do Norte Fluminense. Rio de Janeiro, 2007.

VIEIRA, R. T. **Análise de Micropadrões em Imagens Digitais baseadas em Números Fuzzy**. São Carlos: USP, 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Departamento de Energia Elétrica, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2013.

WORBOYS, M. F. **GIS: A Computing Perspective**. London, Taylor and Francis, 1995.

YANG, K.; HUANG, G. W.; TAMAI, N. **A Hybrid Model for Estimating Global Solar Radiation**. Solar Energy, vol. 70, pp. 13-22, 2001.

ZADEH, A. **Fuzzy Sets**. Information and Controls, v.8, pp. 338-353. 1965.

ZAMBON, K. L.; CARNEIRO, A. A. F. M.; NEGRI, J. C. **Análise de Decisão Multicritério na Localização de Usinas Termoeletricas Utilizando SIG**. Revista Pesquisa Operacional, v. 25, n.2, pp. 183-199. 2005.

ZARZA, E. **Generación Directa de Vapor con Colectores Cilindro Parabólicos - Proyecto Direct Solar Steam**. Universidad de Sevilla, Tesis Doctoral. 2003.

APÊNDICE A – Valores Médios Mensais e Médios Anuais dos Efeitos do Sombreamento, das Perdas Finais na Extremidade do Coletor e do Modificados do Ângulo de Incidência.

Recife			
	η_{shadow}	η_{endloss}	K
Jan	0,949991	0,973740	0,999359
Fev	0,937262	0,989006	0,999172
Mar	0,936379	0,992529	0,992533
Abr	0,939372	0,971622	0,991280
Mai	0,936959	0,953580	0,987283
Jun	0,928505	0,944579	0,977385
Jul	0,921111	0,949196	0,982703
Ago	0,930296	0,964716	0,993434
Set	0,951763	0,984563	0,996429
Out	0,973831	0,995653	0,998168
Nov	0,983327	0,978404	0,999268
Dez	0,975870	0,969713	0,999422
Anual	<i>0,947055</i>	<i>0,972275</i>	<i>0,993163</i>

Arcoverde			
	η_{shadow}	η_{endloss}	K
Jan	0,938643	0,974060	0,999322
Fev	0,925510	0,989296	0,999107
Mar	0,924187	0,992182	0,992569
Abr	0,926704	0,971270	0,984262
Mai	0,923906	0,953177	0,986825
Jun	0,915273	0,944156	0,976804
Jul	0,900837	0,948809	0,982209
Ago	0,917507	0,964363	0,996139
Set	0,939393	0,984215	0,999100
Out	0,962069	0,996032	0,999265
Nov	0,972081	0,978785	0,999347
Dez	1,000056	0,970090	0,999564
Anual	<i>0,937176</i>	<i>0,972203</i>	<i>0,992885</i>

APÊNDICE A – Valores Médios Mensais e Médios Anuais dos Efeitos do Sombreamento, das Perdas Finais na Extremidade do Coletor e do Modificados do Ângulo de Incidência. (CONTINUAÇÃO)

Serra Talhada			
	η_{shadow}	η_{endloss}	K
Jan	0,930915	0,973368	0,999702
Fev	0,918147	0,988644	0,993169
Mar	0,917265	0,992873	0,992405
Abr	0,920255	0,971956	0,990386
Mai	0,917877	0,953940	0,987589
Jun	0,903789	0,944974	0,977815
Jul	0,889242	0,949597	0,983093
Ago	0,906895	0,965073	0,996625
Set	0,932638	0,984874	0,998738
Out	0,954926	0,995355	0,999089
Nov	0,964619	0,978110	0,991258
Dez	0,957080	0,969382	0,999214
Anual	0,926137	0,972346	0,992424

Petrolina			
	η_{shadow}	η_{endloss}	K
Jan	0,921459	0,975010	0,999414
Fev	0,898080	0,990175	0,997899
Mar	0,893856	0,991212	0,996558
Abr	0,896948	0,970271	0,999436
Mai	0,889981	0,952033	0,985514
Jun	0,872625	0,942948	0,975131
Jul	0,860033	0,947684	0,980770
Ago	0,878524	0,963347	0,995284
Set	0,919666	0,983245	0,997850
Out	0,943546	0,996592	0,999112
Nov	0,943546	0,979855	0,999583
Dez	0,947918	0,971163	0,999957
Anual	0,905515	0,971961	0,993453

APÊNDICE B – Relação dos Resultados Obtidos no Estudo de Localização de Usinas Solares Termoelétricas

ANEXO A – PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS GEODÉSICOS DE REFERÊNCIA SAD-69 E SIRGAS2000

Os parâmetros de transformação entre o SAD-69 e o SIRGAS2000 estão listados a seguir. A formulação matemática aplicada nas transformações está divulgada na seção 3 do anexo da Resolução do Presidente do IBGE Nº 23, de 21 de janeiro de 1989.

- SAD-69 para SIRGAS2000:

$$\begin{aligned}a_1 &= 6.378.160\text{m} \\ f_1 &= 1/298,25 \\ a_2 &= 6.378.137\text{m} \\ f_2 &= 1/298,257222101\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta X &= - 67,35\text{m} \\ \Delta Y &= + 3,88\text{m} \\ \Delta Z &= - 38,22\text{m}\end{aligned}$$

- SIRGAS2000 para SAD-69:

$$\begin{aligned}a_1 &= 6.378.137\text{m} \\ f_1 &= 1/298,25222101 \\ a_2 &= 6.378.160\text{m} \\ f_2 &= 1/298,25\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta X &= + 67,35\text{m} \\ \Delta Y &= - 3,88\text{m} \\ \Delta Z &= + 38,22\text{m}\end{aligned}$$

Onde:

a_1, f_1 = parâmetros geométricos do elipsoide do sistema de origem;
 a_2, f_2 = parâmetros geométricos do elipsoide do sistema de destino;
 $(\Delta X, \Delta Y \text{ e } \Delta Z)$ = parâmetros de transformação entre os sistemas.

ANEXO B – EQUAÇÕES DIFERENCIAIS SIMPLIFICADAS DE MOLONDES NKY

$$\Delta\varphi^{\circ} = \frac{1}{M_1} \{ (a_1\Delta f + f_1\Delta a) \sin 2\varphi_1 - \Delta x \sin\varphi_1 \cos\lambda_1 - \Delta y \sin\varphi_1 \sin\lambda_1 + \Delta z \cos\varphi_1 \} \cdot 180/\pi$$

$$\Delta\lambda^{\circ} = \left(\frac{1}{N_1 \cos\varphi_1} \right) \cdot \{ -\Delta x \sin\lambda_1 + \Delta y \cos\lambda_1 \} \cdot 180/\pi$$

$$\Delta N = (a_1\Delta f + f_1\Delta a) \sin^2\varphi_1 - \Delta a + \Delta x \cos\varphi_1 \cos\lambda_1 + \Delta y \cos\varphi_1 \sin\lambda_1 + \Delta z \sin\varphi_1$$

$$\varphi_2^{\circ} = \varphi_1^{\circ} + \Delta\varphi^{\circ}$$

$$\lambda_2^{\circ} = \lambda_1^{\circ} + \Delta\lambda^{\circ}$$

Onde:

a_1 = semi eixo maior do elipsoide no sistema S_1 ;

f_1 = achatamento do elipsoide no sistema S_1 ;

φ_1 = latitude geodésica no sistema S_1 ;

λ_1 = longitude geodésica no sistema S_1 ;

a_2 = semi eixo maior do elipsoide no sistema S_2 ;

f_2 = achatamento do elipsoide no sistema S_2 ;

φ_2 = latitude geodésica no sistema S_2 ;

λ_2 = longitude geodésica no sistema S_2 ;

ΔN = diferença de geondulação (S_2 - S_1)

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ = parâmetros de translação do sistema S_1 em relação ao S_2 ;

$\Delta a = a_2 - a_1$;

$\Delta f = f_2 - f_1$;

N_1 = raio de curvatura do primeiro vertical no S_1 ;

M_1 = raio de curvatura meridiana no S_1 .

**ANEXO C – MUNICÍPIOS PERNAMBUCANOS CUJA POPULAÇÃO É
MAIOR QUE 25.000 HABITANTES SEGUNDO A ESTIMATIVA
POPULACIONAL DE 2014 DO IBGE**

Município	Nº de Habitantes
Quipapá	25.381
Itapissuma	25.514
Condado	25.632
Tupanatinga	26.172
Itaíba	26.462
Panelas	26.490
Pombos	26.779
Taquaritinga do Norte	27.188
Tabira	27.778
Caetés	27.959
Ibimirim	28.403
Passira	29.031
Trindade	29.182
Ipubi	29.338
Gameleira	29.829
Glória do Goitá	30.111
Floresta	31.454
Nazaré da Mata	31.951
Exu	32.001
Vicência	32.014
João Alfredo	32.651
Cabrobó	32.927
São José do Egito	33.188
São José do Belmonte	33.610
Petrolândia	34.939
Sertânia	35.207
Água Preta	35.344
Custódia	35.884
Itambé	36.256
Afogados da Ingazeira	36.547

Continuação da Tabela (Anexo C)

Município	Nº de Habitantes
São Caitano	36.626
Bodocó	37.054
Bonito	38.122
Aliança	38.248
Bom Jardim	38.871
Lajedo	38.898
Catende	40.857
Toritama	41.035
Santa Maria da Boa Vista	41.103
Barreiros	42.105
Águas Belas	42.291
Sirinhaém	43.620
Ribeirão	46.433
Bom Conselho	47.520
Brejo da Madre de Deus	48.541
Timbaúba	53.844
Paudalho	54.547
Buíque	55.905
Limoeiro	56.336
São Bento do Una	57.046
Salgueiro	59.409
Bezerros	60.301
Moreno	60.435
Palmares	62.020
Surubim	62.530
Pesqueira	65.770
Escada	66.907
Ouricuri	67.098
Arcoverde	72.672
Belo Jardim	75.186
Goiana	78.287
Carpina	80.194

Continuação da Tabela (Anexo C)

Município	Nº de Habitantes
Gravatá	81.182
Araripina	82.298
Serra Talhada	83.712
Ipojuca	89.660
Abreu e Lima	98.201
Santa Cruz do Capibaribe	99.232
São Lourenço da Mata	109.298
Igarassu	110.917
Vitória de Santo Antão	134.871
Garanhuns	136.057
Camaragibe	152.840
Cabo de Santo Agostinho	198.383
Paulista	319.769
Petrolina	326.017
Caruaru	342.328
Olinda	388.821
Jaboatão dos Guararapes	680.943
Recife	1.608.488

ANEXO D – DIA MÉDIO MENSAL DE ACORDO COM RABL

Tabela – Dias Médios Mensais Recomendados.

Meses	Valores de “n” conforme o dia do mês	<i>Dias Médios Mensais</i>		
		Dias	Data	δ
Janeiro	i	17	17	- 20,9
Fevereiro	$31 + i$	16	47	- 13,0
Março	$59 + i$	16	75	- 2,4
Abril	$90 + i$	15	105	9,4
Maio	$120 + i$	15	135	18,8
Junho	$151 + i$	11	162	23,1
Julho	$181 + i$	17	198	21,2
Agosto	$212 + i$	16	228	13,5
Setembro	$243 + i$	15	258	2,2
Outubro	$273 + i$	15	288	- 9,6
Novembro	$304 + i$	14	318	- 18,9
Dezembro	$334 + i$	10	344	- 23,0