



ATLAS SOLAR DO ESPÍRITO SANTO

POTENCIAL, TECNOLOGIAS,
APLICAÇÕES E OPORTUNIDADES



**ATLAS
SOLAR
DO ESPÍRITO SANTO**

POTENCIAL, TECNOLOGIAS, APLICAÇÕES E OPORTUNIDADES

Governo do Estado do Espírito Santo

GOVERNADOR: Renato Casagrande
VICE-GOVERNADOR: Ricardo de Rezende Ferraço

Secretaria de Desenvolvimento Econômico (Sedes)

SECRETÁRIO: Rogério Muniz Salume

Agência de Regulação de Serviços Públicos do Estado do Espírito Santo (ARSP)

DIRETOR-PRESIDENTE: Alexandre Careta Ventorim
DIRETORA DE GÁS CANALIZADO E ENERGIA: Debora Cristina Niero
DIRETOR ADMINISTRATIVO, FINANCEIRO E TARIFÁRIO: Eduardo Calegari Fabris
DIRETOR DE SANEAMENTO BÁSICO: Mamoru Togawa Komatsu
DIRETOR DE INFRAESTRUTURA, MOBILIDADE E LOTERIA: Pedro Torraca Daemon
GERENTE DE ENERGIA ELÉTRICA: Tatiana Pires André Bayerl

Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper)

DIRETOR-GERAL: Alessandro Broedel Torezani
DIRETOR TÉCNICO: Antônio Elias Souza da Silva
DIRETOR ADMINISTRATIVO: Cleber Bueno Guerra

Editoração

ARSP, INCAPER e Artcom

Autorizada a reprodução parcial ou integral desde que citada a fonte.

Como Referenciar: DELPUPO, A. M.; MAIA, I. F.; OLIVEIRA, A. B. R. S.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; NIERO, D. C.; RAMOS, H. E. A.; PANTOJA, P. H. B.; MEDEIROS, T. T. B. **Atlas Solar do Espírito Santo** - Potencial, tecnologias, aplicações e oportunidades, 2 ed. Vitória. ARSP, 2025. 189p. Disponível em: <https://arsp.es.gov.br/estudos-energeticos>

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)

A21a

Atlas Solar do Espírito Santo : Potencial, tecnologias, aplicações e oportunidades / organizadores, Alexandre de Mello Delpupo e Ivaniel Fôro Maia –
2. ed. __ Vitória, ES : ARSP, Incaper, 2025.
189 p. : il., color. ; 21 x 28 cm.

ISBN: 978-65-01-85614-8 (impresso)

ISBN: 978-65-00-68546-6 (e-book).

DOI: 10.5281/zenodo.17640991

1. Espírito Santo (Estado) – Energia Solar. 2. Energia Limpa. 3. Célula fotovoltaica. 4. Radiação solar. 5. Usina solar. 6. Geração de energia elétrica. 7. Climatologia. 8. Precipitação. 8 Temperatura. 2. I. Delpupo, Alexandre de Mello (Org.). II. Maia, Ivaniel Fôro (Org.). III. Agência de Regulação de Serviços Públicos do Estado do Espírito Santo (ARSP). IV. Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper).

CDD 392.4

Ficha catalográfica elaborada por Eugenia Magna Broseguini Keys – CRB-6/MG nº 408-ES



LISTA DE MAPAS

Mapa 1.1.a - Irradiação Global no plano horizontal, média anual, 1983 a 2005 (kWh/m ² /dia).	25
Mapa 1.2.b - Irradiação global no plano horizontal, média anual, em 2025 (kWh/m ² /dia).	26
Mapa 1.3 - Irradiação total diária no Brasil em plano com inclinação igual a latitude local.	29
Mapa 1.4 - Mapa da irradiação total diária no plano inclinado, média anual, e da infraestrutura energética no Espírito Santo.	35
Mapa 1.5 - Mapa da infraestrutura energética do Estado do Espírito Santo	37
Mapa 5.1 - Potencial de geração solar fotovoltaica em termos do rendimento energético anual para todo o Brasil (kWh/kWp.ano).	73
Mapa 6.1 - Precipitação média anual (1978-2019), período seco no Espírito Santo (mm).	80
Mapa 6.2 - Precipitação média anual (1978-2019), período chuvoso no Espírito Santo (mm).	81
Mapa 6.3 - Precipitação média anual (1978-2019) no Espírito Santo (mm).	82
Mapa 6.4 - Precipitação média durante o verão (1978-2019) no Espírito Santo (mm).	84
Mapa 6.5 - Precipitação média durante o outono (1978-2019) no Espírito Santo (mm).	86
Mapa 6.6 - Precipitação média durante o inverno (1978-2019) no Espírito Santo (mm).	88
Mapa 6.7 - Precipitação média durante a primavera (1978-2019) no Espírito Santo (mm).	89
Mapa 6.8 - Temperatura média anual. Climatologia de (1978-2019) no Espírito Santo (°C)	91
Mapa 6.9 - Temperatura média máxima no Espírito Santo durante o verão (°C).	93
Mapa 6.10 - Temperatura média mínima no Espírito Santo durante o verão (°C).	94
Mapa 6.11 - Temperatura média máxima no Espírito Santo durante o outono (°C).	95
Mapa 6.12 - Temperatura média mínima no Espírito Santo durante o outono (°C).	97
Mapa 6.13 - Temperatura média máxima no Espírito Santo durante o inverno (°C).	98
Mapa 6.14 - Temperatura média mínima no Espírito Santo durante o inverno (°C).	100
Mapa 6.15 - Temperatura média máxima no Espírito Santo durante a primavera (°C).	101
Mapa 6.16 - Temperatura média mínima no Espírito Santo durante a primavera (°C).	102
Mapa 9.1 - Irradiação solar global diária, média anual, no Espírito Santo (Wh/m ² .dia).	125
Mapa 9.2 - Irradiação solar global diária, médias mensais, no Espírito Santo (Wh/m ² .dia).	126
Mapa 9.3 - Irradiação solar diária, no plano inclinado, média anual, no Espírito Santo (Wh/m ² .dia).	129
Mapa 9.4 - Irradiação solar diária, no plano inclinado, médias mensais, no ES (Wh/m ² .dia).	130
Mapa 9.5 - Irradiação solar direta normal, total diário, média anual, no Espírito Santo (Wh/m ² .dia).	133
Mapa 9.6 - Irradiação solar diária direta normal, médias mensais, no Espírito Santo (Wh/m ² .dia).	134
Mapa 9.7 - Irradiação solar diária PAR, média anual, no Espírito Santo (Wh/m ² .dia).	137
Mapa 9.8 - Irradiação solar diária PAR, médias mensais, no Espírito Santo (Wh/m ² .dia).	138
Mapa 9.9 - Irradiação solar nas coberturas das edificações do Residencial Jabaeté, Vila Velha, ES para a média anual (2018), modelo 3D.	142
Mapa 10.1 - Potencial dos Espelhos D'água e Infraestrutura Energética do Espírito Santo.	157

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Componentes da irradiação solar – Radiação difusa, direta e refletida (albedo).	23
Figura 1.2 - Diagrama dos processos de interação da irradiação solar e cósmica, com a atmosfera terrestre.	24
Figura 2.1 - Diagrama e exemplo de sistema de aquecimento solar térmico residencial e comercial.	40
Figura 2.2 - Energia economizada de outras fontes com o uso de sistemas de aquecimento solar térmico, por m ² instalado.	42
Figuras 2.3 - Foto e esquema básico do conjunto para aquecimento solar em que o reservatório é alimentado pela caixa d'água.	43
Figuras 2.4 - Principais formas de aplicações da energia solar térmica nas edificações residenciais.	43
Figura 2.5 - Esquema de geração de corrente contínua por células fotovoltaicas.	45
Figuras 2.6 - Exemplos de célula, módulo e painel fotovoltaico.	45
Figuras 2.7 - Módulos com células de silício monocristalino, policristalino e filme fino.	46
Figura 2.8 - Cilindro e placas de silício.	46
Figura 2.9 - Filmes finos fotovoltaicos (FV).	47
Figura 2.10 - Instalações fotovoltaicas isoladas.	48

Figura 2.11 - Infográfico de geração solar fotovoltaica em sistema isolado (<i>off-grid</i>).	48
Figura 2.12 - Topologias dos sistemas de geração fotovoltaica <i>off-grid</i> e <i>on-grid</i>	49
Figuras 2.13 - Topologias dos sistemas de geração solar com armazenamento.	49
Figura 2.14 - Sistema de geração solar fotovoltaica com armazenamento por baterias.	51
Figura 2.15 - Geração centralizada – usinas de geração centralizada solar fotovoltaica.	51
Figuras 2.16 - Esquema e foto de uma usina solar com concentradores cilíndrico-parabólicos.	52
Figuras 2.17 - Esquema e exemplo de uma usina solar com concentradores em torre.	53
Figuras 2.18 - Concentrador solar por meio de disco parabólico.	54
Figura 3.1 - Esquema típico de um sistema de microgeração fotovoltaica.	59
Figura 4.1 - Fotos de residências com sistemas fotovoltaicos no Espírito Santo.	67
Figura 7.1 - Diagrama da conversão de energia solar em energia química (carboidratos) pelas folhas.	106
Figura 7.2 - Cultura de café e banana no município de Água Doce do Norte, ES.	107
Figura 7.3 - Secador solar tipo gaveta e tipo túnel.	107
Figura 7.4 - Culturas de frutas, verduras e legumes.	107
Figura 7.5 - Criação de aves, suínos e bovinos.	108
Figuras 7.6 - Agricultores em estufa de secar café e estufa de secar café em uso.	109
Figura 7.7 - Exemplos de formas de uso da energia solar na irrigação (sistema isolado, <i>off-grid</i>).	109
Figura 7.8 - Diagrama de um sistema fotovoltaico de bombeamento com aplicações para irrigação, consumo humano, animal e controlado (sistema isolado).	110
Figura 7.9 - Sistema fotovoltaico para bombeamento de água rural (sistema isolado).	111
Figura 10.1 - Usina por Concentração Solar (CSP) com coletores cilindro-parabólicos, Shams 1.	146
Figuras 10.2 - Usina por concentração solar (CSP) em torre central, Califórnia, EUA.	147
Figura 10.3 - Projetos solares por CSP no deserto dos EUA e suas potências instaladas (MWp).	148
Figura 10.4 - Parque Solar Caucharí, província de Jujuy, Argentina.	149
Figura 10.5 - Parque Solar Nova Olinda, Piauí, Brasil.	150
Figura 10.6 - Usina Solar Fotovoltaica São Gonçalo do Gurguéia, Piauí.	150
Figura 10.7 - Usina Solar Pirapora, em Pirapora, MG, 321 MWp.	151
Figura 10.8 - Usina Solar Nova Olinda, Ribeira do Piauí, PI, 292 MWp.	151
Figura 10.9 - Usina Solar Ituverava, Tabocas do Brejo Velho, BA, 254 MWp.	152
Figura 10.10 - Usina Solar Bom Jesus da Lapa, Bom Jesus da Lapa, BA, 158 MWp.	152
Figura 10.11 - Usina Solar Guaimbê, Guaimbê, SP, 150 MWp.	153
Figura 10.12 - Usina Solar Apodi, Quixeré, CE, 132 MWp.	153
Figura 10.13 - Usina solar fotovoltaica flutuante na China, 40 MWp.	155
Figuras 10.14 - Usina solar fotovoltaica flutuante no reservatório de Sobradinho, BA.	156
Figuras 10.15 - Usina solar fotovoltaica flutuante em fazendas.	156
Figura 10.16 - Esquema de funcionamento do sistema agrivoltaico.	159
Figura 10.17 - Sistema agrivoltaico instalado em cultivo.	160
Figura 10.18 - Sistema agrivoltaico instalado em substituição a estufa do morangueiro 1.	161
Figura 10.19 - Sistema agrivoltaico instalado em substituição a estufa do morangueiro 2.	162
Figura 10.20 - Sistema agrivoltaico instalado em substituição a estufa do morangueiro 3.	163
Figura 10.21 - Usina solar fotovoltaica no estacionamento da UFPR, Curitiba, PR.	164
Figura 10.22 - Energia Solar na Iluminação Pública, no Parque Barigui, Curitiba, PR.	164
Figura 10.23 - Usinas FV no Mineirão, Mané Garrincha, Arena Pernambuco e Maracanã.	165
Figura 10.24 - Bairro Solar: Serra Dourada, Serra, ES e Aquecedor Solar (reservatório e placa).	166
Figura 10.25 - Usina Fotovoltaicas na Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes), Campus Goiabeiras, Vitória.	167
Figura 10.26 - Usinas públicas na Residência Oficial Governador Espírito Santo e na EEEFM Conceição Silva.	167
Figura 10.27 - Usinas fotovoltaicas residenciais e comerciais no Espírito Santo.	168
Figura 10.28 - Usinas para pesquisa em energia fotovoltaica do ES, CPID e Ifes – Serra.	169
Figura 10.29 - Parque solar fotovoltaico por geração compartilhada no Estado.	170
Figura 10.30 - Usina Solar Juparanã (USJ) – Linhares.	170

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Usinas fotovoltaicas por outorga em operação no Brasil, em 2024.	31
Tabela 1.2 - Usinas fotovoltaicas no Brasil por Geração Distribuída (GD), em 2024.	32
Tabela 1.3 - Irradiação solar no plano inclinado no Espírito Santo, energia, potencial e área.	33
Tabela 1.4 - Capacidade instalada solar térmica no Espírito Santo – Programa Bairro Solar.	36
Tabela 2.1 - Tecnologias de placas fotovoltaicas - Eficiência típica dos módulos comerciais (m ² /kWp).	47
Tabela 2.2 - Eficiência típica dos módulos fotovoltaicos, comparação de % de eficiência.	47

Tabela 2.3 - As tecnologias de baterias e suas características.	50
Tabela 3.1 - Geração Distribuída (GD), até 5 MW, conforme a Resolução Normativa nº 482 e Lei nº 14.300, de 06 de janeiro de 2022.	58
Tabela 4.1 - Custo médio de um sistema fotovoltaico residencial com potência de 1,4kWp (R\$/kWp).	65
Tabela 4.2 - Custo médio de um sistema composto térmico e fotovoltaico em 2024.	68
Tabela 9.1 - Métricas de validação das médias mensais dos totais diários de irradiação global horizontal para cada região brasileira.	123
Tabela 10.1 - Potencial dos Espelhos D'água no Espírito Santo pelo CAR.	158

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1.1 - Produção mundial de células fotovoltaicas de 2000 a 2030 (GW).	22
Gráfico 1.2 - Adições de capacidade solar fotovoltaica, reais e previstas por país/região, de 2015 a 2026 (GWp).	27
Gráfico 1.3 - Parcela de fontes renováveis gerando energia elétrica, por fontes e região, em 2040.	27
Gráfico 1.4 - Potência instalada de geração de energia elétrica por fonte no Brasil, em 2024.	30
Gráfico 2.1 - Evolução do mercado de aquecimento solar brasileiro.	41
Gráfico 2.2 - Distribuição das vendas de aquecedores por segmento no Brasil – base 2014.	41
Gráfico 2.3 - Capacidade instalada de usinas solares heliotérmicas no mundo segundo tecnologia e status da planta (MW).	55

Gráfico 3.1 - Custos de investimento em sistemas fotovoltaicos – média Brasil, em mil R\$/kW.	60
Gráfico 3.2 - Custos de investimento em kits fotovoltaicos – média Brasil em mil R\$/kWp.	60
Gráfico 4.1 - Evolução do preço de um sistema fotovoltaico residencial de 4kWp (R\$/kWp).	64
Gráfico 4.2 - Evolução do número de conexões por geração distribuída no Espírito Santo.	66
Gráfico 4.3 - Evolução da potência instalada por geração distribuída no Espírito Santo (kWp).	66
Gráfico 9.1 - Dispersão entre os valores observados e modelados para as médias mensais do total diário de irradiação global horizontal para a Região Sudeste.	123
Gráfico 9.2 - Histograma e função de probabilidade acumulada para cada intervalo de desvio do modelo em relação à média observada para a Região Sudeste.	124

ORGANIZADORES

Alexandre de Mello Delpupo

Técnico Contábil, 1991. Bacharel em Física, Ufes, 1998. Inventor Técnico-científico pelo Instituto Brasileiro de Inventores (IBI), 2001. Doutorado em Física, por dossiê, tipo Honoris Causa, pelo Centro Brasileiro Pesquisas Físicas (CBPF), 2008. Especialista em Regulação na ARSP à partir de 2011. Especialização em Gestão Pública e Inovação, ESESP, 2025. C. V. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4325894199868947>

Ivaniél Fôro Maia

Bacharel em Meteorologia pela Universidade Federal do Pará (UFPA), Tecnólogo e Especialista em Gestão Ambiental e Sustentabilidade, Prof. licenciado em Física, Agente de Pesquisa e Inovação em Desenvolvimento Rural e Meteorologista no Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incapcer). CV. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0879588113646374>

AUTORES

Alexandre de Mello Delpupo

Ivaniél Fôro Maia

Antônio de Oliveira Junior

Bacharelado e Licenciatura em Geografia pela Ufes, 2008. Especialista em Regulação na Agência Estadual de Recursos Hídricos do Espírito Santo (AGERH). CV. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5507387296289511>

Débora Cristina Niero

Graduação em Engenharia de Petróleo no Centro Universitário Vila Velha, 2010. Mestre em Engenharia Mecânica pela Ufes, 2014. Especialista em Regulação e Fiscalização na Agência de Regulação de Serviços Públicos do Espírito Santo (ARSP, antes ASPE).

Angela Beatriz Rosa da Silva de Oliveira

Graduada em Geografia pela Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes). Bolsista do projeto Monitoramento Agrometeorológico do Espírito Santo, no Incaper. CV. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7393277309060240>

Hugo Ely dos Anjos Ramos

Coordenador de Meteorologia do Incaper. Bacharel em Meteorologia (UFPA), 2007. Especialista em Gestão de Recursos Hídricos pelo Centro Universitário Educacional (Uninter), 2021. Agente de Pesquisa e Inovação em Desenvolvimento Rural. CV. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4675770715070150>

Pedro Henrique Bonfim Pantoja

Bacharel em Meteorologia pela Universidade Federal do Pará (UFPA), 2010. Mestre em Engenharia Ambiental. Agente de Pesquisa e Inovação em Desenvolvimento Rural no Incaper. CV. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0884963520267671>

Tháбата Teixeira Brito de Medeiros

Graduação em Meteorologia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). M.Sc. em Engenharia de Biosistemas. Agente de Pesquisa e Inovação em Desenvolvimento Rural no Incaper. CV. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8402698363222506>.

COLABORADORES

Dimas Piontkovsky

Técnico Agrícola pela Escola Agrotécnica Federal de Santa Teresa (EAFST), 1976. Bolsista do projeto Aprendendo com a Chuva, no Incaper. Atua nos seguintes temas: climatologia, apicultura, agrometeorologia. CV. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1900539574441462>

Leonardo Faria de Araújo Campos

Graduação em Saneamento Básico. Estagiário da Diretoria de Saneamento da ARSP. 2020.

Mayara Vilela de Oliveira

Bacharel e Mestre em Meteorologia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Analista Backoffice de Energia na Santa Maria Comercialização e Serviços de Energia LTDA, Empresa do Grupo Santa Maria. CV. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2208104000910421>

Tatiana Pires André Bayerl

Tecnóloga em Petróleo e Gás pela Faculdade Batista de Vitória, 2007. Pós-graduada em Logística Empresarial pela Faculdade Batista de Vitória, 2010. Gerente de Energia Elétrica da Agência de Regulação de Serviços Públicos do Espírito Santo (ARSP).

AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos às concessionárias distribuidoras de energia elétrica do Estado do Espírito Santo, Empresa Luz e Força Santa Maria (Santa Maria) e a Energias de Portugal no Brasil (EDP ES), pelas contribuições com informações da infraestrutura elétrica de distribuição.

Agradecemos aos servidores da Agência de Regulação de Serviços Públicos do Espírito Santo (ARSP) e do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper) que colaboraram com a elaboração desta obra de maneira direta e indireta.

À equipe da Agência de Regulação de Recursos Hídricos do Espírito Santo (AGERH) pela participação no estudo e na elaboração do mapa do potencial dos espelhos d'água no Espírito Santo.

Aos colaboradores bolsistas da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (Fapes) ao longo do período, no Incaper, e aos do programa Jovens Valores, na ARSP.

Agradecemos também a todas as pessoas, empresas e instituições que, de alguma maneira, contribuíram para a elaboração da 2ª edição deste relevante estudo.

A large, stylized sun graphic in a golden-yellow color, composed of several triangular rays radiating from the center. The sun is centered on the page and serves as the background for the text.

**O POTENCIAL SOLAR
TRAZ À MATRIZ
ENERGÉTICA MAIOR
AUTONOMIA E
EFICIÊNCIA**

Em um mundo cada vez mais sedento por energia, um dos nossos maiores desafios é adotar fontes capazes de suprir as necessidades atuais de consumo, sem comprometer a qualidade de vida das pessoas, a segurança e a própria sobrevivência das próximas gerações. A consciência de que os recursos naturais, em sua maioria, não são infinitos, tem levado os países do mundo inteiro a buscar soluções alternativas que garantam uma exploração planejada, confiável e de baixo custo e, ao mesmo tempo, uma convivência não destrutiva com o planeta. Afinal, o desenvolvimento econômico de estados e regiões depende hoje, mais do que nunca, da identificação e da correta exploração de recursos que permitam a geração de energia limpa, a partir de fontes renováveis. Por isso, nos últimos anos, os investimentos em pesquisas nesse campo cresceram muito e têm apresentado excelentes resultados.

Entre as fontes mais eficientes de energia limpa, renovável e compatível com projetos de expansão econômica e desenvolvimento social, destaca-se nitidamente a energia solar, devido à sua confiabilidade e à consistente redução de custos das tecnologias utilizadas em sua exploração. Sem alarde, porque o mérito será sempre do conjunto da população, o Governo do Espírito Santo tem analisado cuidadosamente o nosso potencial de exploração dessa forma de energia, assim como a de sua ampliação em nossa matriz energética, para garantir a continuidade do processo de desenvolvimento econômico e social em todas as regiões do Estado.

A fim de compartilharmos essas análises com a população, com as empresas já instaladas e com

os investidores interessados em implantar empreendimentos em terras capixabas, apoiamos a iniciativa da Agência de Regulação de Serviços Públicos do Espírito Santo (ARSP), que, em conjunto com o Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper), elaborou a 2ª edição do Atlas Solar do Estado Espírito Santo, no qual são apresentadas as potencialidades de crescimento da economia estadual, ampliadas pela eficiência e diversificação da matriz energética, com informações dessa fonte.

Temos a convicção de que o estímulo ao uso da energia solar e a promoção de mudanças culturais que impulsionem a inovação tecnológica e reduzam custos constituem passos decisivos rumo ao desenvolvimento sustentável do Espírito Santo. Trata-se de um modelo que preserva o meio ambiente e as características sociais e econômicas de cada região, gerando oportunidades de crescimento individual, social e profissional compatíveis com o potencial dos municípios e de seus moradores.

Estamos construindo, assim, um novo modelo de desenvolvimento sustentável, com soluções integradas, benefícios diretos e indiretos para a população e maior equilíbrio na distribuição geográfica dos investimentos públicos e privados. Todos os programas que executamos integram esse modelo de gestão e convergem harmoniosamente para objetivos globais, sociais e econômicos, que os capixabas definiram e estão se transformando em realidade. Esse é o compromisso que assumimos e o cenário que o Governo do Estado do Espírito Santo está construindo nas diversas regiões, com transparência, firmeza e responsabilidade.

The background features a stylized sun with dark green rays radiating from a central dark green circle. The rays are triangular and point outwards, creating a starburst effect against a white background.

**ENERGIA SOLAR,
LIMPA, RENOVÁVEL
E A MAIS ABUNDANTE**

Alexandre Careta Ventorim

Diretor-Presidente da ARSP

Débora Cristina Niero

Diretora de Gás Canalizado e Energia

Tatiana Pires André Bayerl

Gerente de Energia Elétrica e equipe ARSP

Estamos vivendo uma realidade na qual a humanidade busca por suprimentos energéticos renováveis para atender ao crescimento das demandas por bem-estar e qualidade de vida, de forma ambiental, social e economicamente sustentável.

O Brasil e o Espírito Santo possuem importantes potenciais naturais para geração de energia limpa, a partir dos bioenergéticos, dos ventos, dos rios e do sol. A Agência de Regulação de Serviços Públicos do Estado do Espírito Santo (ARSP) tem se dedicado a realizar estudos e incentivar o uso desses tipos de energias.

No presente estudo, colocamos à disposição da sociedade informações fundamentais para o conhecimento e aproveitamento do potencial que o sol oferece em todo o território do Espírito Santo para geração de energia, tanto nas regiões urbanas quanto rurais, e contemplando, ainda, todas as classes de consumidores: rurais, residenciais, comerciais, públicos e industriais.

Neste contexto, no Atlas Solar do Espírito Santo são abordadas as diversas formas

de uso do potencial solar e os caminhos que a sociedade precisa conhecer para aproveitar essa energia limpa e abundante, que pode ser transformada diretamente em calor, pelos coletores solares de aquecimento, ou em energia elétrica, pelos painéis fotovoltaicos (e pelas placas neutrinovoltáicas, projetos em P&D e já pré-industrializados) ou ainda, por meio de concentradores heliotérmicos. A usina solar é uma das formas mais fáceis e práticas para a sociedade aproveitar a energia renovável, podendo ser construída em pequeno e grande portes.

Para contribuir com informações para a ampliação do uso dessa fonte na matriz energética estadual e, conseqüentemente, com a sustentabilidade, a ARSP, em parceria com o Incaper, apresenta o Atlas Solar no Espírito Santo - Potencial, Tecnologias, Aplicações e Oportunidades, 2ª Edição, trazendo dados atualizados até 2024. A expectativa é que haja fortalecimento e crescimento do setor energético local a partir da energia solar, que proporcione o desenvolvimento regional.


The background features a stylized sun with rays. The sun is represented by a central blue circle with white rays extending outwards. The rays are composed of white triangles pointing towards the center. The overall color scheme is blue and white.

INFORMAÇÕES PARA AVANÇAR NO USO DA ENERGIA SOLAR

Franco Fiorot
Diretor-presidente do Incaper

Antônio Elias Souza da Silva
Diretor Técnico do Incaper e equipe

Hugo Ely dos Anjos Ramos
Coordenador de Meteorologia (CMET) e equipe

 desenvolvimento deste estudo, em parceria com a Agência de Regulação de Serviços Públicos do Estado do Espírito Santo (ARSP), teve como finalidade principal apresentar, de maneira geral, os aspectos da tecnologia de energia solar e sua aplicação em diversos setores, inclusive na agricultura. Assim, além de servir como um referencial de pesquisa para estudantes, pesquisadores e professores, o documento atende também a gestores públicos e privados, bem como à sociedade civil.

O Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper) participou com grande satisfação da elaboração deste documento, uma vez que a iniciativa vai ao encontro da missão do órgão: promover soluções tecnológicas e sociais por meio de ações integradas de pesquisa, assistência técnica e extensão rural, visando ao desenvolvimento do Espírito Santo. Neste trabalho, o Incaper contribuiu com o conhecimento desenvolvido pela equipe da Coordenação de Meteorologia, subsidiando-o com informações relevantes para a temática em questão.

Entendemos que, atualmente, a população mundial enfrenta inúmeros desafios devido à crescente demanda por água, alimentos e energia, além da necessidade de mitigar os efeitos danosos provocados pelas mudanças climáticas globais. Por essa razão, muitos pesquisadores têm concentrado esforços para viabilizar o máximo aproveitamento dos recursos naturais, a fim de otimizar os processos de produção, buscando a mais alta eficiência energética e contribuindo para o desenvolvimento da humanidade.

Para alcançar esse desenvolvimento de maneira sustentável, é necessário promover mudanças comportamentais e pensar no uso eficaz dos recursos naturais. O sol é uma fonte inesgotável de energia, disponibilizada gratuitamente em sua forma primária, com potencial para ser amplamente empregada nos diversos sistemas de produção no ambiente agrícola. Dessa forma, a energia solar merece atenção especial, pois pode ser utilizada como fonte principal para o desenvolvimento metabólico de plantas e animais ou combinada com a energia proveniente de outras fontes, como eólica, hidrelétrica e biogás, e na produção de bens de consumo, além de proporcionar conforto e bem-estar social tanto para esta geração quanto para as futuras.

O uso crescente da energia solar nos processos de produção diminui a pressão sobre a utilização de fontes não renováveis de energia, como o petróleo e seus derivados. Além disso, trata-se de uma energia limpa e de baixo impacto ao meio ambiente, pois gera quantidades insignificantes de gases de efeito estufa, e seu processo de produção é mais seguro quando comparado à produção de energia a partir da geração a carvão, de usinas termelétricas ou nucleares.

As reflexões sobre essas questões estão presentes neste documento, considerado de grande importância para o desenvolvimento do Espírito Santo, pois, por meio da divulgação das diversas técnicas e possibilidades de uso da energia solar, é possível favorecer a intensificação do uso dessa fonte e, conseqüentemente, beneficiar diretamente o usuário ao reduzir os gastos com energia proveniente de outras fontes.

SUMÁRIO

1. Energia Solar	21
1.1 Introdução	22
1.2 A Radiação Solar	22
1.3 Estimativas da radiação solar	24
1.4 A energia solar no mundo	25
1.4.1 Distribuição geográfica	25
1.4.2 Uso da energia solar no mundo	26
1.5 A energia solar no Brasil	28
1.5.1 Estudos de irradiação solar no Brasil	28
1.5.2 Geração elétrica por fonte no Brasil	30
1.5.2.1 Geração fotovoltaica por outorga no Brasil	30
1.5.2.2 Geração fotovoltaica por Geração Distribuída no Brasil	31
1.6 Potencial solar e infraestrutura energética no Estado do Espírito Santo	33
1.6.1 Introdução ao potencial natural de irradiação solar no Estado	33
1.6.2 A infraestrutura energética do Espírito Santo	36
2. Tecnologias para o Aproveitamento da Energia Solar	39
2.1 Tecnologia solar térmica para aquecimento	40
2.1.1 Tecnologia solar térmica no Brasil	40
2.1.2 Aplicações para aquecimento e sistemas de aquecimento residencial típicos	43
2.2 Tecnologia solar para geração de energia elétrica	44
2.2.1 Tecnologias fotovoltaicas	44
2.2.1.1 Silício cristalino	46
2.2.1.2 Filmes finos	46
2.2.2 Formas de aplicações da geração fotovoltaica	48
2.2.2.1 Geração distribuída fotovoltaica simples (Geração)	48
2.2.2.2 Geração distribuída fotovoltaica híbrida, por meio de geração e armazenamento	49
2.2.2.3 Geração centralizada fotovoltaica	51
2.2.3 Tecnologia de Concentração Solar (CSP)	52
2.2.3.1 Concentradores solar cilíndrico-parabólicos	52
2.2.3.2 Concentrador solar em torre	52
2.2.3.3 Concentrador solar por meio de disco parabólico	54
3. Sistemas de Micro e Minigeração Fotovoltaica de Energia Elétrica	57
3.1 Resolução Normativa 482/2012 da Aneel e Lei nº 14.300, de 06 de janeiro de 2022	58
3.2 Custos médios para sistemas de microgeração fotovoltaica	59
3.3 Procedimentos para a implantação de um sistema de geração fotovoltaica	61
4. Estimativas para projetos típicos de uso da energia solar no Espírito Santo	63
4.1 Sistema fotovoltaico residencial	64
4.2 Sistema de aquecimento residencial	67
4.3 Sistema composto fotovoltaico e aquecimento residencial	68

5. Potencial para empreendimentos de geração solar de grande porte	71
5.1 Potencial nacional para empreendimentos solares de grande porte	72
5.2 Macrorregiões com aptidão para geração fotovoltaica de maior porte no Espírito Santo	74
5.3 Macrorregiões com aptidão para geração heliotérmica de maior porte no Espírito Santo	74
6. Climatologia do Espírito Santo	77
6.1 Introdução a Climatologia do Espírito Santo	78
6.2 Precipitação no Espírito Santo	83
6.3 Temperaturas no Espírito Santo	92
7. Energia Solar na Agropecuária e Silvicultura	105
8. Mecanismos de Incentivo à Energia Solar	113
8.1 Mecanismos de incentivos federais	114
8.2 Mecanismos de incentivos estaduais	116
8.3 Mecanismos de incentivo pelo Estado do Espírito Santo	116
9. Mapas Solarimétricos do Espírito Santo	121
9.1 Metodologia	122
9.1.1 Validação das estimativas do modelo BRASIL-SR	122
9.2 Mapas da irradiação solar global diária horizontal no ES (Wh/m ² .dia)	125
9.3 Mapas da irradiação solar no plano inclinado no Espírito Santo (Wh/m ² .dia)	129
9.4 Mapas da irradiação solar direta normal no Espírito Santo (Wh/m ² .dia)	133
9.5 Mapas da irradiação solar PAR (Photosynthetically Active Radiation, ou Irradiação Fotossinteticamente Ativa)	137
9.6 Análises dos Mapas de Irradiação Solar	141
9.7 Mapa Solar Interativo – Proposta de Método para a cidade de Vitória, ES	142
10. Aplicações da Energia Solar	147
10.1 Usinas Solares no Mundo	148
10.1.1 Usina por Concentração Solar (CSP) com coletores cilindro-parabólicos, Shams 1, Abu Dhabi – Emirados Árabes	148
10.1.2 Coletores cilindro-parabólico – Usina por Concentração Solar (CSP) com Torre Central, Califórnia – Estados Unidos da América	149
10.2 Usinas solares fotovoltaicas de grande porte na América do Sul	151
10.3 Usinas solares brasileiras	152
10.3.1 Usina solar fotovoltaica São Gonçalo do Gurguéia, Piauí	152
10.3.2 As seis maiores usinas solares fotovoltaicas brasileiras até 2019	153
10.3.3 Usinas solares fotovoltaicas flutuantes	156
10.3.4 Os espelhos d’água e suas potencialidades no Espírito Santo	159
10.3.5 Sistemas agrivoltaicos, usos e funcionamento	160
10.3.6 Usinas solares em estacionamentos e para a iluminação pública	165
10.4 Usinas solares nos estádios brasileiros	167
10.5 As usinas solares no Estado do Espírito Santo	168
11. Considerações e Proposições	175
REFERÊNCIAS	178
APÊNDICES	186



CAPÍTULO

1.

Energía Solar

1.1 Introdução

A crescente preocupação com a preservação do meio ambiente, o aumento da demanda energética, a possibilidade de redução da oferta de combustíveis convencionais e uma maior conscientização mundial da necessidade de utilização de fontes renováveis estão impulsionando a comunidade científica a pesquisar e desenvolver fontes alternativas de energia menos poluentes, renováveis e que causem pouco impacto ambiental, em especial, a fonte solar^[1,77].

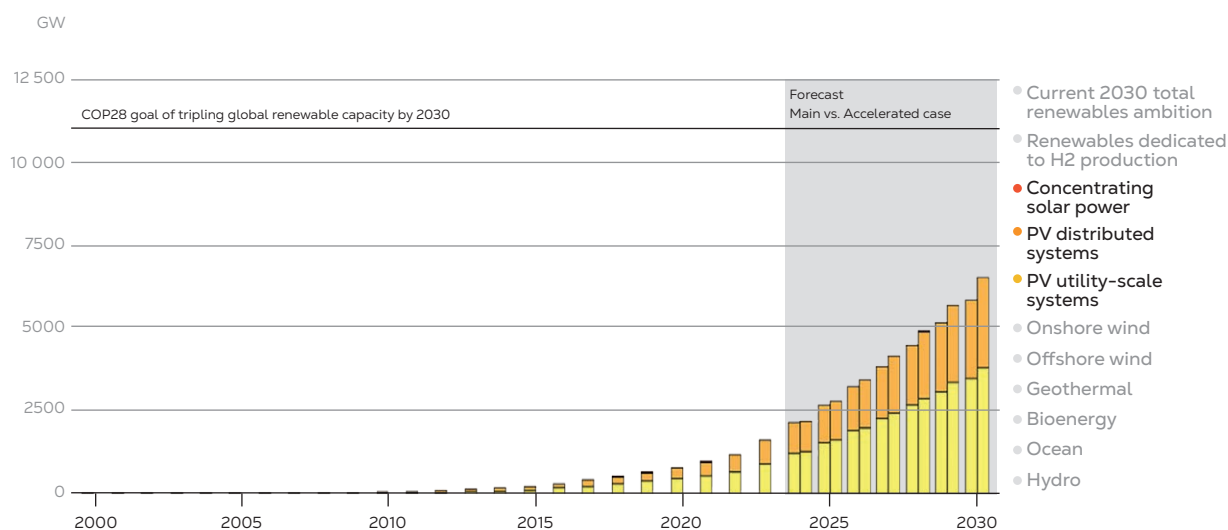
As tecnologias que propiciam a captação da energia proveniente do sol estão em permanente desenvolvimento, permitindo assim sua utilização com sucesso em várias situações e empreendimentos^[2].

Tanto o aumento da eficiência energética quanto a constante redução dos custos das

tecnologias de aproveitamento solar levaram-na a um considerável crescimento na matriz energética mundial e brasileira^[2], assim como no Espírito Santo. Dessa forma, esta obra aborda aspectos no âmbito mundial, do Brasil e do Estado e apresenta informações passadas, atuais e projeções, além de trazer dados de séries históricas longas das grandezas físicas, radiação solar, precipitação e temperatura, dentre outras, que, mesmo não tão recentes à primeira vista, são cumulativas e essenciais.

A utilização das formas de energias renováveis, em especial a solar fotovoltaica (FV), mostrou-se com forte crescimento entre os anos de 2008 e 2023^[72], como confirma o gráfico 1.1. Saltou de 15,1GW para 1.618,5GW a potência de sistemas fotovoltaicos (FV) instalados. A previsão é de 5.828,8GW em 2030.

GRÁFICO 1.1 Produção mundial de células fotovoltaicas de 2000 a 2030 (GW)



Fonte: IEA, Rastreador de Progresso de Energia Renovável, atualizado em 9 out. 2024.

1.2 A Radiação Solar

A radiação solar global, composta pela radiação difusa e direta, é utilizada tradicionalmente como fonte de energia térmica para aquecimento de fluidos, para iluminação de ambientes e para geração de energia mecânica ou elétrica^[2] (ver figura 1.1). Para um maior aproveitamento

da radiação global, ela pode ser captada e medida no plano inclinado, chamada de radiação no plano inclinado.

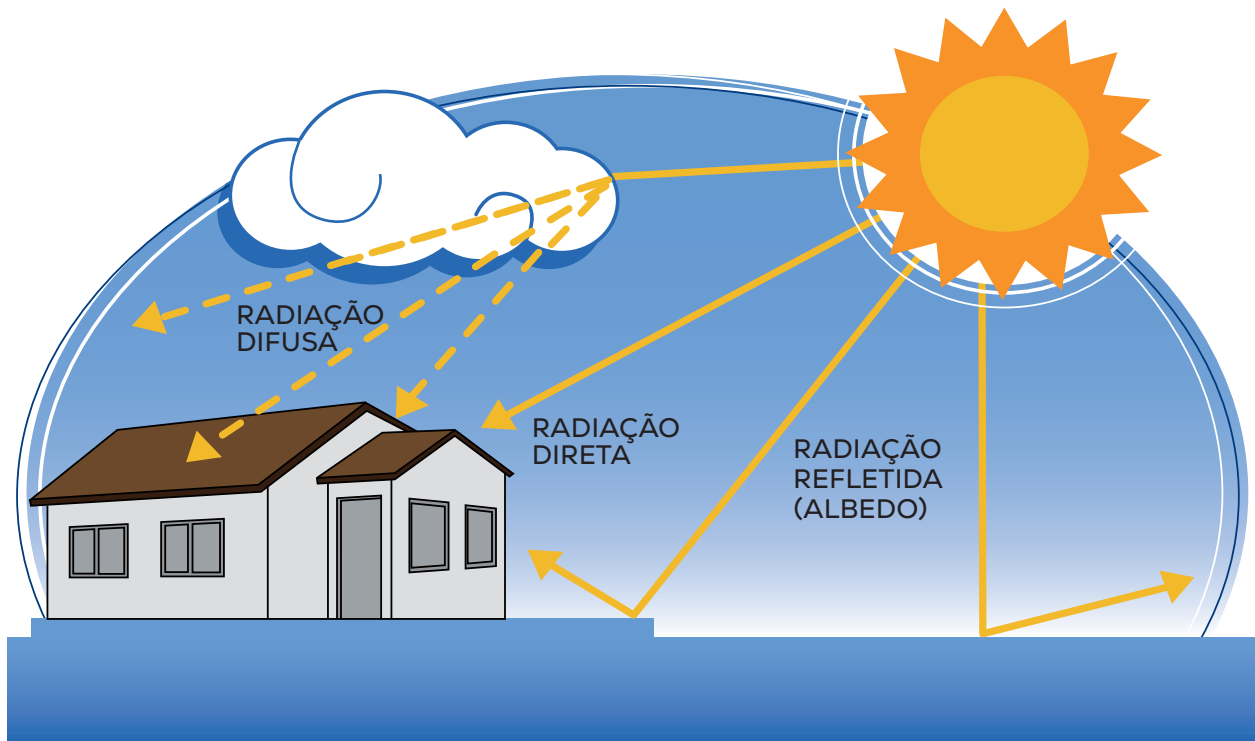
A radiação direta em determinado local é aquela medida por um elemento na superfície terrestre perpendicular aos raios do sol,

excluindo a insolação difusa, que é aquela refratada ou refletida por componentes atmosféricos (nuvens, neblinas etc.). A radiação refletida pela superfície do planeta é chamada de albedo.

A medição da radiação global (direta e difusa) é extremamente importante, principalmente para os estudos de viabilidade de instalações de sistemas solares fotovoltaicos. Além das condições atmosféricas

(nebulosidade, umidade relativa do ar e outras), a quantidade de radiação que chega na superfície depende da inclinação do eixo imaginário da Terra e de sua trajetória elíptica, da latitude local e do período do ano. A fim de quantificar essa radiação, certos instrumentos são utilizados, como os piranômetros e os pireliômetros^[1]. Mais detalhes sobre esses instrumentos se encontram no apêndice B.

FIGURA 1.1 Componentes da irradiação solar – Radiação difusa, direta e refletida (albedo)



Componentes da radiação solar^[3]



Fonte: Atlas Solar do Espírito Santo, 1ª Edição. 2013.

Em termos de relações da energia solar com as outras fontes renováveis, com exceção da energia maremotriz e da geotérmica, cabe ressaltar que as demais podem ser vistas como usos indiretos da energia solar, no sentido que elas são oriundas da fonte solar.

Por exemplo, a bioeletricidade depende da conversão da energia solar em biomassa por meio da fotossíntese; a energia eólica decorre

de gradientes de temperatura entre massas de ar aquecidas de forma não homogênea; e, finalmente, as usinas hidrelétricas dependem do ciclo da água, cujo “motor” é a energia solar.

Há duas classes principais de uso direto da radiação solar: i) aquecimento de água; e ii) produção de eletricidade. No capítulo sobre as tecnologias de aproveitamento, serão detalhadas as diversas aplicações da energia solar.



1.3 Estimativas da radiação solar

A radiação solar interage fortemente com a atmosfera terrestre, sendo absorvida e espalhada pelos gases atmosféricos e aerossóis. É um processo no qual a energia é transferida por meio de ondas eletromagnéticas que viajam a uma velocidade constante, ou seja, esta variável meteorológica serve para determinar a quantidade de “calor” que chega na superfície terrestre.

Ao atravessar a atmosfera, a radiação solar de onda curta (altas frequências e energias) sofre processos físicos de absorção, espalhamento e reflexão. O mesmo processo ocorre na superfície do planeta, quando a radiação emitida pela superfície atravessa a atmosfera em direção ao espaço.

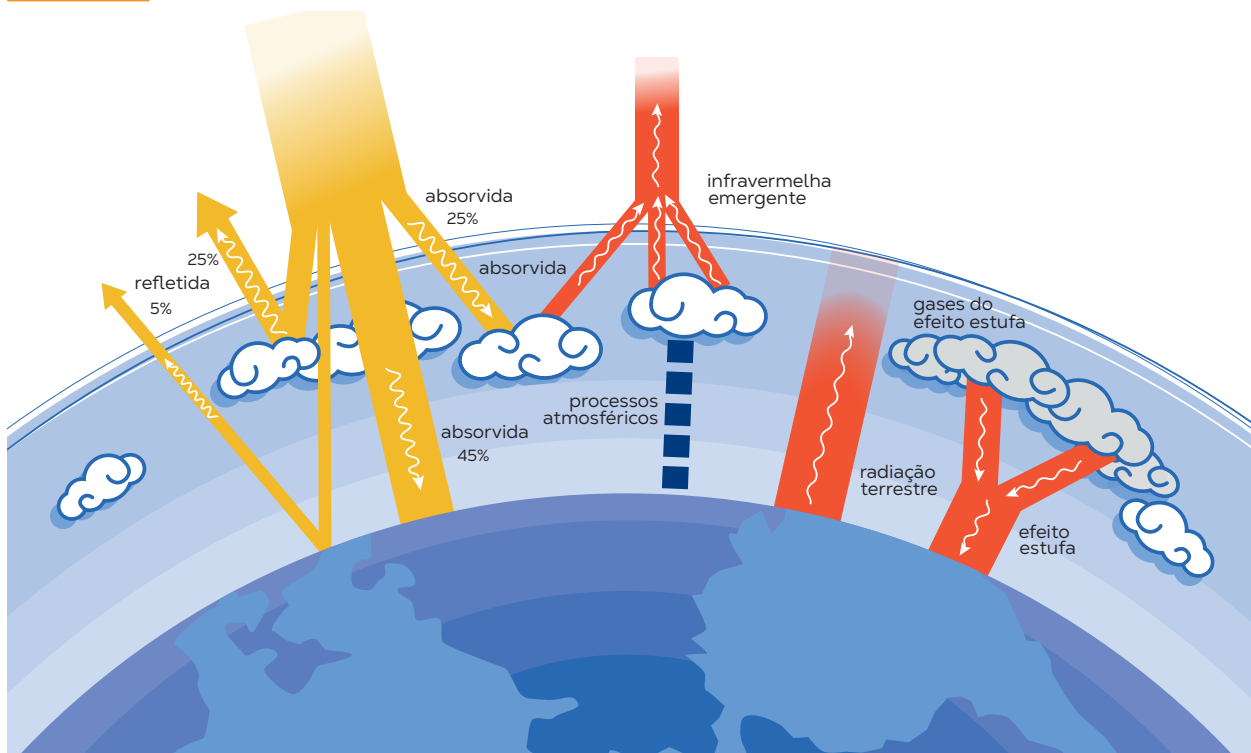
Embora a radiação solar incida em linha reta, os componentes da atmosfera podem gerar

seu espalhamento, dispersando-a em todas as direções. Assim, apenas uma pequena parte da radiação incidente chega à superfície de forma direta, o restante é refletido de volta para o espaço ou absorvido ou espalhado até atingir a superfície da Terra ou retornar ao espaço.

Os componentes da atmosfera, como as nuvens, os gases, as partículas atmosféricas e a superfície, refletem cerca de 25% e absorvem 25% da radiação incidente. Os outros 50% chegam à superfície terrestre, sendo 45% absorvidos e uma pequena porção, 5%, refletida, de acordo com o tipo de obstáculo encontrado.

No diagrama da figura 1.2, são apresentados, de forma simplificada, os principais processos de interação da radiação solar no sistema Atmosfera-Terra.

FIGURA 1.2 Diagrama dos processos de interação da irradiação solar e cósmica, com a atmosfera terrestre



Fonte: INPE. Os valores numéricos representam a fração de energia em cada processo radiativo na atmosfera.

Os números a seguir caracterizam muito a radiação solar no mundo:

- (i) a energia da radiação solar que atinge a atmosfera a cada ano é $1,52 \times 10^{18}$ kWh; e
- (ii) o consumo primário anual de energia no mundo, o qual variou, de 2010 para 2018^[73], de $1,40 \times 10^{14}$ kWh para $1,62 \times 10^{14}$ kWh. Esse consumo decresce a partir de 2025, conforme o site <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy>

Isso significa que:



Um aproveitamento de apenas 0,01% da radiação solar seria suficiente para suprir toda a demanda energética mundial. Ou, equivalentemente, uma hora de energia solar incidente sobre o planeta equivale ao consumo energético mundial anual.”

**BP Statistical Review 2019, published in June 2019.
Statistical Review of World Energy^[73].**

No apêndice A, encontram-se o espectro da irradiação solar e as análises do mesmo.

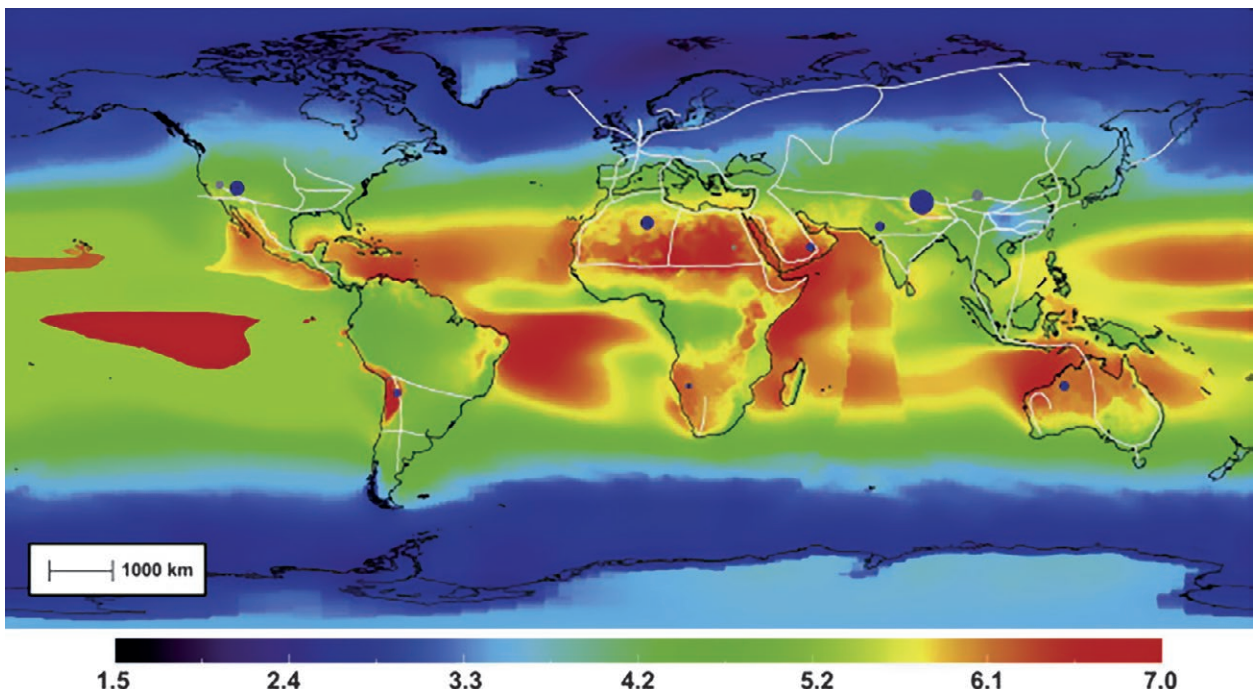
1.4 A energia solar no mundo

1.4.1 Distribuição geográfica

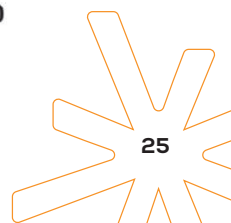
Os mapas a seguir ilustram a distribuição da irradiação média global no planeta. O primeiro traz uma vista completa da Terra por meio de uma longa série histórica, o segundo destaca a intensa radiação até os ângulos de 60° de latitude norte e sul. Observa-se que as áreas dos continentes mais ensolaradas se situam nas regiões desérticas

ou semiáridas da África (por exemplo, o Saara), na região dos Andes (como o Deserto do Atacama), na Austrália e na Península Arábica. No Brasil, as cores mais quentes estão no semiárido, estendendo para a região Sudeste. Nos polos, embora seja baixa a irradiação média anual, tem-se possibilidade de uso da irradiação solar nos dias claros.

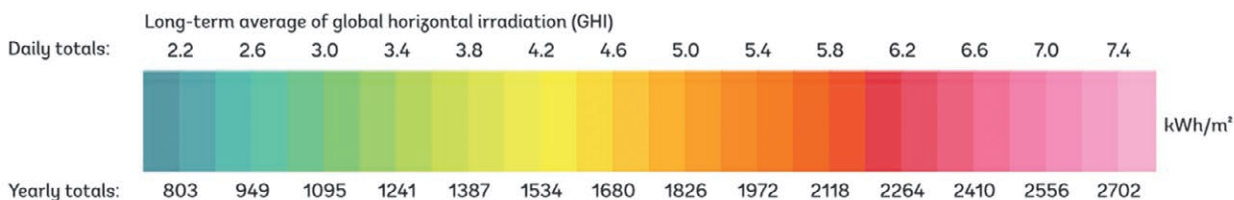
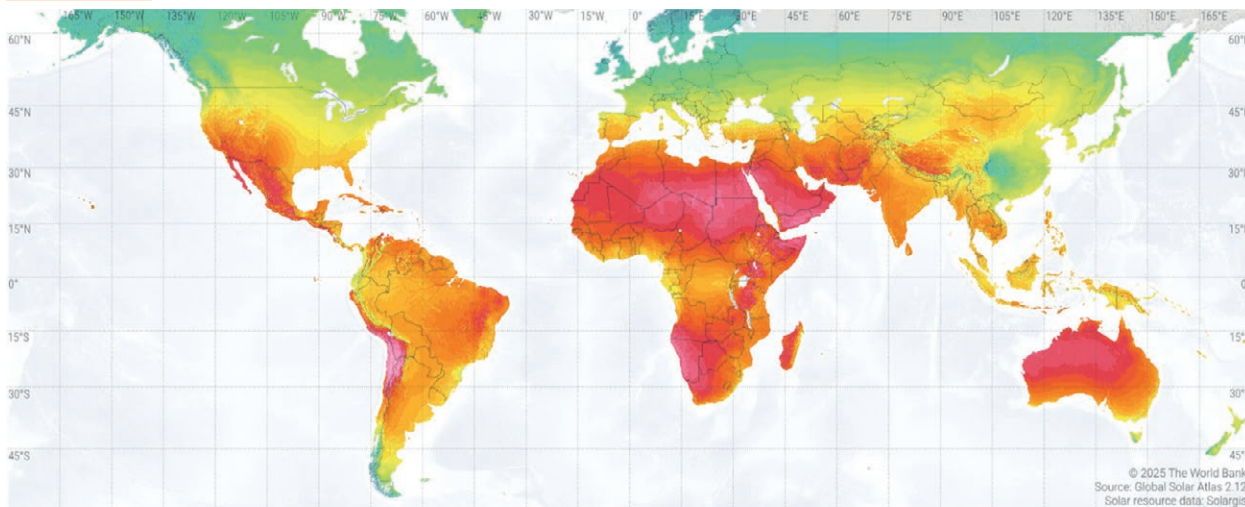
MAPA 1.1.A Irradiação Global no plano horizontal, média anual, 1983 a 2005 (kWh/m²/dia)



Fonte: NASA. Atlas Solar, 1ª Edição.



MAPA 1.2.B Irradiação global no plano horizontal, média anual, em 2025 (kWh/m²/dia)



Fonte: Solaris, para o Banco Mundial, 2025.

1.4.2 Uso da energia solar no mundo

O Atlas da Energia Solar no Espírito Santo, 1ª Edição, por meio da Agência Internacional de Energia^[4] (International Energy Agency – IEA), apontou que as fontes renováveis avançam na geração de energia: o cenário estima um aumento da quota de energias renováveis para a geração de energia elétrica mundial, de 20%, em 2010, de 28%, em 2020, e 57% até 2050. Nesse cenário, 7.500 TWh de eletricidade renovável são gerados em 2020 de um total de 27.165 TWh. Hidrelétricas dão a maior contribuição (17% da geração total de eletricidade), seguidas pela eólica (6%), biomassa e resíduos (3%) e solar (2%).

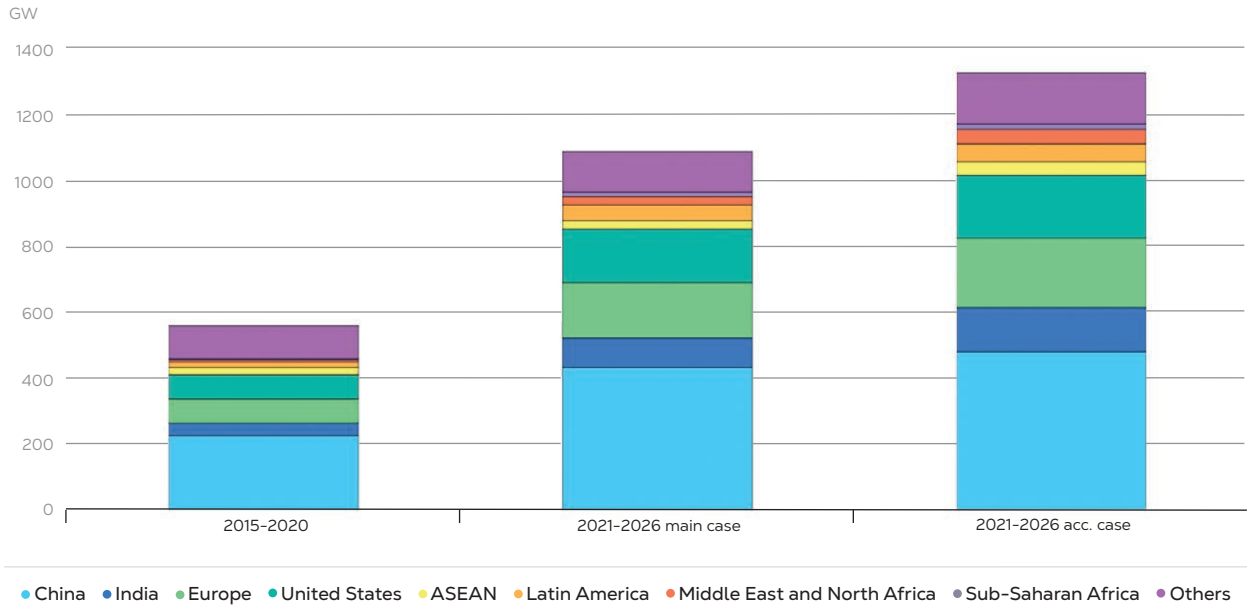
A geração de energia solar fotovoltaica apresentou um crescimento rápido, com expansão de níveis marginais em 2000 para 65 TWh em relação a 2011 (acréscimo de 47% ao ano), com aumento acima de 32 TWh em 2010^[4]. No ano de 2012, as capacidades instaladas na Alemanha, China, Itália e EUA aumentaram, respectivamente, 7,6 GW, 3,5 GW, 3,3 GW e 3,3 GW. A instalação no restante do mundo foi de 15,0 MW^[6].

Atualmente, conforme o gráfico 1.2, com dados da IEA sobre a capacidade instalada fotovoltaica no mundo, de 2015 a 2026, alcance-se uma potência total da ordem de 1.100GW no caso principal e superior a 1.300 GW no acelerado. Em 2015 era de 600 GW.

A IEA também informa, nos gráficos do Navegador de Dados de Estatísticas de Energia, que a produção de energia por usina solar concentrada não teve o crescimento como a energia solar fotovoltaica. Em 2019, a primeira atingiu 13.367 GWh, embora fosse projetado 100 TWh^[4].

Segundo o World Energy Outlook 2012^[5], as fontes de energia renováveis ganharam o seu lugar ao sol. A rápida expansão das energias eólica e solar tem consolidado a posição das energias renováveis como componente indispensável da matriz energética global. A energia solar cresce mais rapidamente do que qualquer outra das tecnologias de energias renováveis. As fontes renováveis tornaram-se a segunda fonte mundial de geração de eletricidade já em 2015 (aproximadamente, metade do tanto gerado pelo carvão).

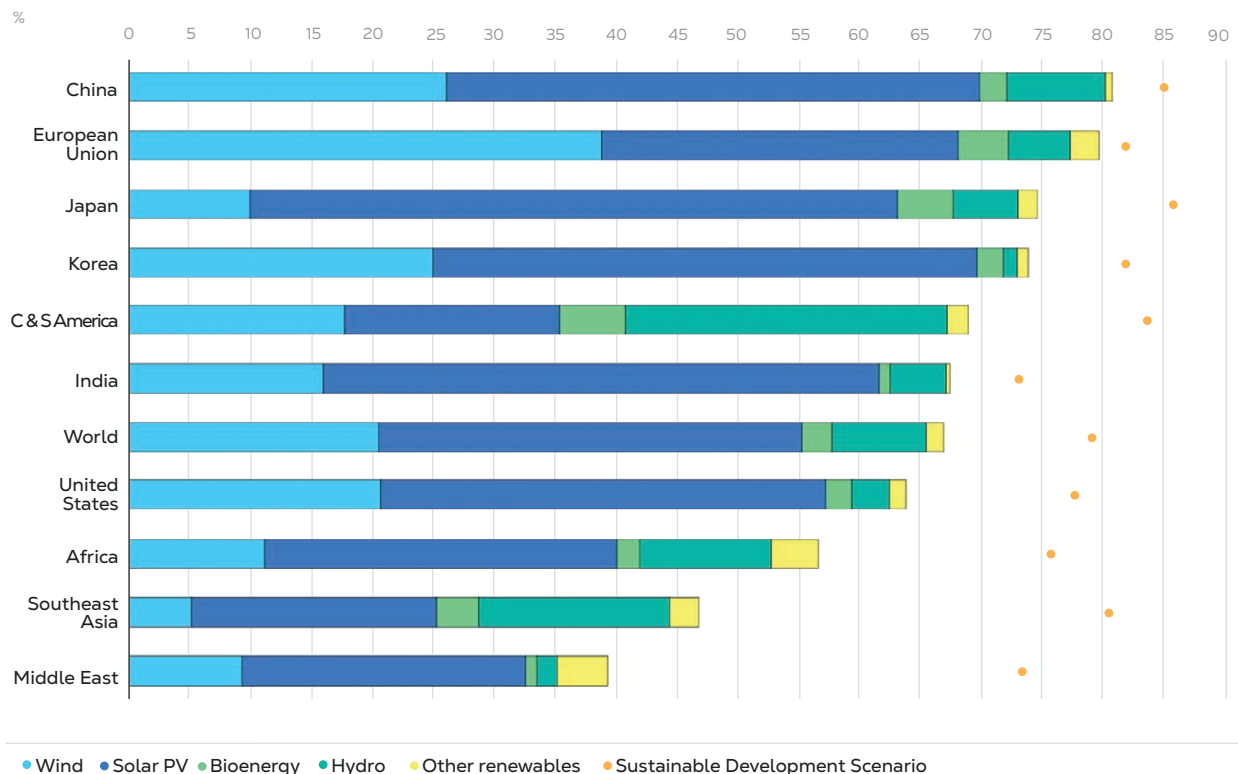
GRÁFICO 1.2 Adições de capacidade solar fotovoltaica, reais e previstas por país/região, de 2015 a 2026 (GWp)



Fonte: IEA. Eletricidade renovável ^[74], adaptado pela ARSP em 2025.

O gráfico 1.3, a seguir, apresenta o forte crescimento da demanda por energia solar nos principais países, movimentando um investimento da ordem de 10 trilhões de dólares entre 2019 e 2040, tanto para o uso fotovoltaico quanto para o CSP (Concentrated Solar Power/Potência Solar Concentrada).

GRÁFICO 1.3 Parcela de fontes renováveis gerando energia elétrica, por fontes e região, em 2040



Fonte: World Energy Outlook, 2019. IEA^[75].

Ao se compararem as regiões da Europa com as do Brasil ^[1], observa-se que, no Brasil, a média anual do total diário de irradiação solar global varia entre 3,8 e 6,5 kWh/m²/dia. Os países europeus têm variações anuais entre 2,5 e 3,4 kWh/m²/dia na Alemanha, 2,5 e 4,5 kWh/m²/dia na França e 3,4 e 5,0 kWh/m²/dia na Espanha. Ou seja, são países com médias menores de irradiação anual do que as encontradas em terras brasileiras, mas que possuem grande aproveitamento dos recursos

solares, alguns com projetos que contam com fortes incentivos governamentais ^[14].

Vale destacar que o levantamento de dados da potência fiscalizada contabiliza uma capacidade de geração fotovoltaica no Brasil de 5,2 GWp em 2020^[76], ao passo que a capacidade instalada na Alemanha, onde a irradiação solar dos melhores parques é inferior à dos locais de menor irradiação brasileiros, aproxima-se de 45,4GWp acumulados até 2018^[74].

1.5 A energia solar no Brasil

1.5.1 Estudos de irradiação solar no Brasil

Existem quatro versões de estudos estaduais da energia solar do Brasil: os atlas dos Estados de Alagoas, Minas Gerais, Ceará e São Paulo. O Espírito Santo, com este documento, apresenta o potencial solar do Estado e discursa sobre as tecnologias na área, suas formas de aplicações, oportunidades de aproveitamento e tipos de negócios.

Entre os trabalhos pioneiros de avaliação consistente do potencial da energia solar no Brasil, estão o Atlas de Irradiação Solar do Brasil, de 1998^[7], realizado pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e o Atlas Solarimétrico do Brasil, de 2000^[8], desenvolvido pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e pela Companhia Hidroelétrica do São Francisco (Chesf).

Em 2006, foi publicado o Atlas Brasileiro de Energia Solar, produzido no âmbito do projeto SWERA – Solar and Wind Energy Resource Assessment, sob coordenação do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe). Entre os principais produtos apresentados no Atlas, estão os mapas Solarimétricos do País, com resolução espacial de 10 km x 10 km, para o período de 1995 a 2005.

Em 2017^[77], o Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), por meio do seu Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (Labren), publicou a 2ª edição, ampliada e revisada, do Atlas

Brasileiro de Energia Solar. Foi um trabalho cooperativo entre o Inpe e pesquisadores de várias instituições no Brasil: a Universidade Federal de São Paulo (Unifesp), a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e o Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC). Para a estimativa do potencial de energia solar no Brasil, o Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2ª edição, pode ser considerado a referência mais atual e completa http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html#mod.

O novo Atlas Brasileiro de Energia Solar, edição 2017, foi elaborado com o emprego do modelo físico de transferência radiativa, BRASIL-SR, desenvolvido com base no modelo GKSS (Stuhlmann et al., 1990) e adaptado para a climatologia e condições atmosféricas sazonais típicas observadas no Brasil. O modelo BRASIL-SR utiliza dados de cobertura de nuvens obtidos a partir de imagens digitais do satélite geoestacionário GOES, posicionado sobre a América do Sul.

Além das informações de cobertura de nuvens, a execução do modelo requer o uso de base de dados de topografia, albedo de superfície, dados climatológicos de temperatura, umidade relativa e visibilidade atmosférica para todo o território brasileiro. Os resultados produzidos pelo modelo foram validados por meio de comparação estatística com base em dados medidos empregando piranômetros instalados na rede nacional de estações meteorológicas automáticas operada pelo Instituto Nacional de

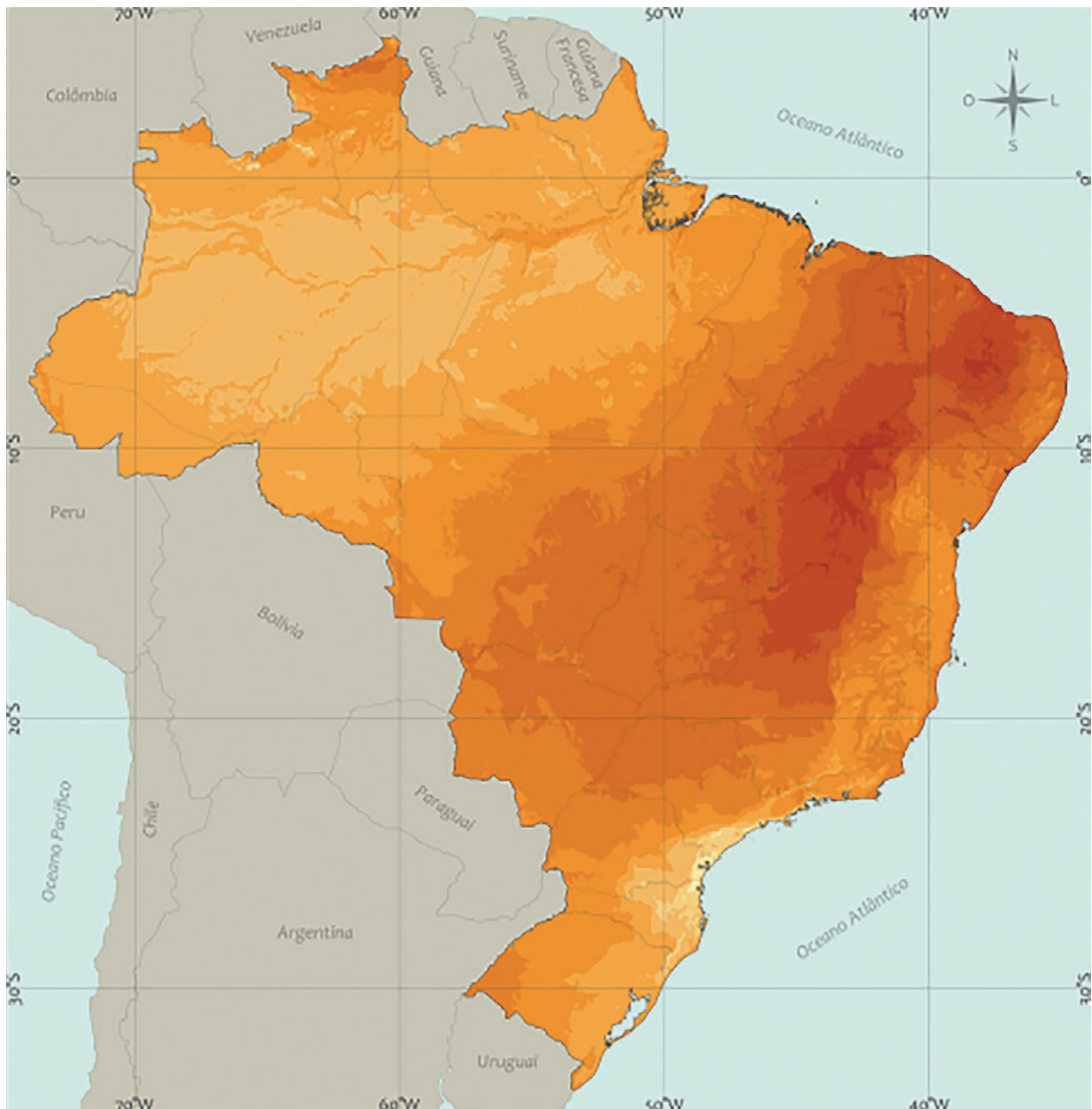
Meteorologia (INMET) e pelo Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais – Rede SONDA – operado pelo Labren/Inpe.

Para a 2ª edição, foram empregados 17 anos de dados satelitais – de 1999 até 2015 –, visto serem os mais recentes e trazerem vários avanços

nas parametrizações do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR.

O mapa a seguir apresenta a radiação solar no plano inclinado (média anual) do Brasil. Observa-se que o País possui boa radiação solar por sua localização tropical.

MAPA 1.3 Irradiação total diária no Brasil em plano com inclinação igual a latitude local



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, Edição de 2017.

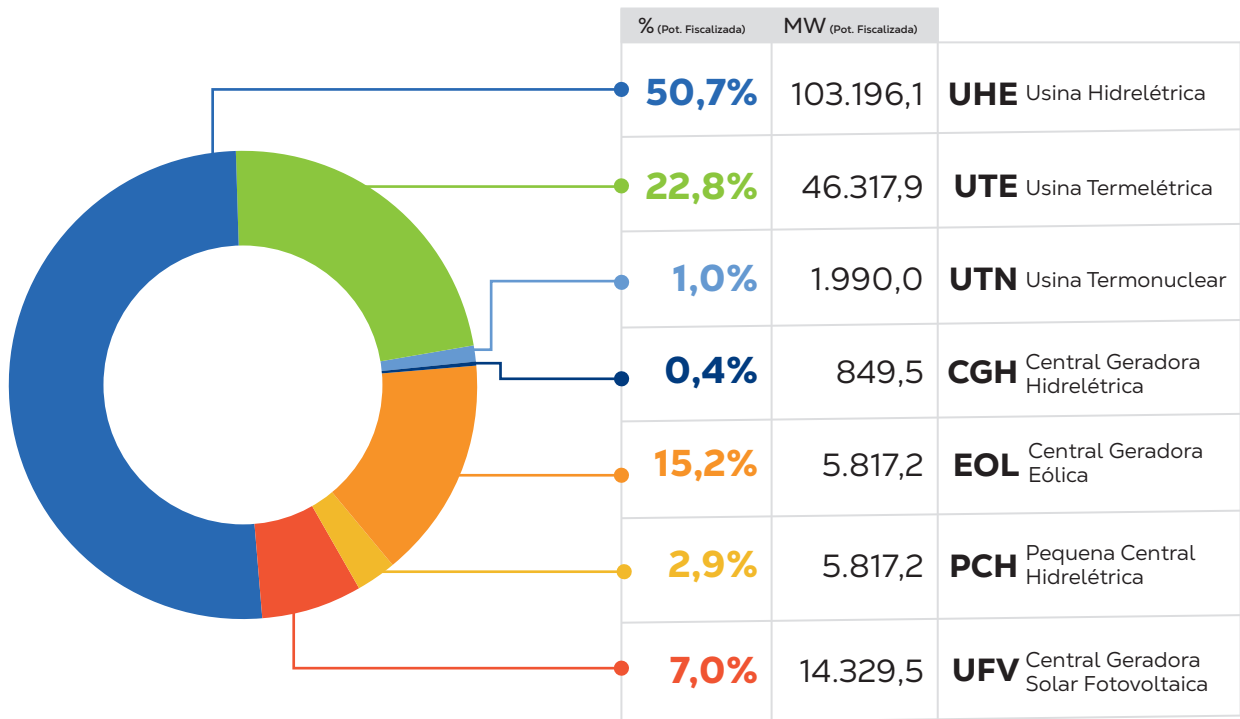
1.5.2 Geração elétrica por fonte no Brasil

A Aneel apresentava em seu site, no Sistema de Informações de Geração da ANEEL – SIGA, em julho de 2024, a distribuição da capacidade

de geração de energia elétrica no Brasil e a potência fiscalizada em operação, como mostra o gráfico 1.4.

GRÁFICO 1.4 Potência instalada de geração de energia elétrica por fonte no Brasil, em 2024

Empreendimentos em Operação no Brasil em 2024 (MW)



Pot. Total = 203,5GW

Fonte: SIGA, Aneel, dado de referência de 01 de julho de 2024. Adaptação ARSP em 01 de julho de 2024.

NOTA: Os valores de porcentagem são referentes à Potência Fiscalizada. A Potência Outorgada é igual à considerada no Ato de Outorga. A Potência Fiscalizada é igual à considerada a partir da operação comercial da primeira unidade geradora.

1.5.2.1 Geração fotovoltaica por outorga no Brasil

A potência instalada fotovoltaica (FV) com outorga por meio de registro e autorização, de 14,33 GW em julho de 2024 no País, equivalia a 6,99% da capacidade elétrica instalada, de uma outorgada brasileira total de 205,06GW, conforme o Sistema de Informação de Geração da Aneel (SIGA). Os estados com maior capacidade instalada FV por outorga estão nas regiões Nordeste e Sudeste do

País, sendo Minas Gerais, Piauí e Bahia os três com maiores potências instaladas.

A seguir, está a tabela com todas as usinas FVs centralizadas por Estado, num total de 18.312 usinas. O País tem 138 usinas FV em construção, com potência de 6,0 GWp, e 2.773 com a construção não iniciada, cuja potência é de 112,4 GWp.

TABELA 1.1 Usinas fotovoltaicas por outorga em operação no Brasil, em 2024

ESTADO	NÚMERO DE USINAS	POTÊNCIA INSTALADA OUTORGADA (kWp)	POTÊNCIA INSTALADA OUTORGADA (%)
MG	134	4.766.783,7	33,27%
PI	71	2.097.863,0	14,64%
BA	71	2.052.111,4	14,32%
CE	51	1.251.606,0	8,73%
RN	43	1.228.225,0	8,57%
PE	56	1.180.825,4	8,24%
SP	78	898.869,8	6,27%
PB	27	663.514,2	4,63%
RS	68	35.411,2	0,25%
MT	319	23.106,4	0,16%
PR	41	16.896,3	0,12%
PA	13.105	16.790,0	0,12%
SC	29	16.641,3	0,12%
RO	508	15.573,3	0,11%
ES	20	14.881,8	0,10%
MS	2.870	11.892,1	0,08%
GO	15	9.524,6	0,07%
TO	62	6.184,4	0,04%
RJ	14	6.069,3	0,04%
AP	1	4.039,2	0,03%
AL	4	3.740,0	0,03%
MA	7	2.432,5	0,02%
RR	2	2.100,0	0,01%
AM	17	1.576,0	0,01%
AC	698	1.412,2	0,01%
DF	1	912,0	0,01%
Total FV Brasil	18.312	14.328.981,0	100,0%

Fonte: SIGA, Aneel, dado de referência de 01 de julho de 2024. Adaptação ARSP em 01 de julho de 2024.

1.5.2.2 Geração fotovoltaica por Geração Distribuída no Brasil

A geração FV na modalidade Geração Distribuída (GD) está apresentada na tabela a seguir. Observa-se que o Estado do Espírito Santo ocupa a 14ª posição em potência instalada por GD, com 643 MWp.

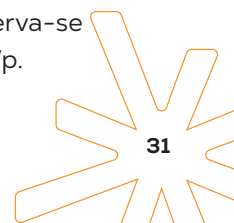


TABELA 1.2 Usinas fotovoltaicas no Brasil por Geração Distribuída (GD), em 2024

UF	QUANTIDADE	QUANTIDADE DE UCS QUE RECEBEM OS CRÉDITOS	POTÊNCIA INSTALADA (kWp)	POTÊNCIA INSTALADA (%)
SP	428.962	506.031	4.092.043,9	13,96%
MG	296.879	684.572	3.885.283,6	13,25%
RS	308.237	417.135	2.797.527,1	9,54%
PR	211.396	307.119	2.714.662,6	9,26%
MT	133.716	162.406	1.838.736,4	6,27%
SC	109.601	139.221	1.412.402,1	4,82%
GO	113.013	141.490	1.320.269,4	4,50%
BA	146.093	230.903	1.291.542,5	4,41%
MS	106.167	149.142	1.163.985,8	3,97%
RJ	121.469	140.858	1.142.104,9	3,90%
CE	85.094	108.044	952.172,7	3,25%
PA	87.261	111.779	951.566,3	3,25%
PE	85.879	149.951	888.162,8	3,03%
ES	50.761	58.572	643.409,6	2,19%
RN	65.400	66.068	632.684,2	2,16%
MA	51.368	74.401	621.434,4	2,12%
PI	55.078	79.940	555.416,5	1,89%
DF	20.698	21.950	413.082,4	1,41%
PB	30.315	54.002	387.643,2	1,32%
TO	36.648	45.934	381.618,6	1,30%
AL	30.151	45.637	340.987,0	1,16%
RO	26.782	33.619	329.801,6	1,13%
AM	10.800	13.670	181.930,5	0,62%
SE	13.769	21.215	176.284,4	0,60%
AC	6.940	7.485	84.298,0	0,29%
AP	5.970	6.456	70.140,1	0,24%
RR	2.703	3.678	45.351,6	0,15%
-	173	236	1.430,3	0,00%
Total GD Brasil	2.641.150	3.781.278	29.314.542,0	100,0%

Fonte: Geração Distribuída, Aneel, período de conexão de 20/06/2009 a 29/05/2024. Adaptado pela AESP em 01 de julho de 2024.

1.6 Potencial solar e infraestrutura energética no Estado do Espírito Santo

1.6.1 Introdução ao potencial natural de irradiação solar no Estado

O Atlas Solar do Espírito Santo, 2ª Edição, tem como objetivo fundamental facilitar a inclusão de fontes de energia renováveis, em especial a fonte solar, na matriz energética do Estado e, por meio dela, inovar com novas tecnologias.

Os mapas da irradiação solar para o território do Espírito Santo têm por base os dados para o território brasileiro, usados no Atlas Brasileiro de Energia Solar, de 2006. Produzido no âmbito do projeto SWERA, sob coordenação do Inpe, e agora atualizado para a 2ª edição em 2017⁽¹⁾.

Uma representação com mapas interativos dos quatro tipos de irradiação, suas médias diárias anuais e mensais em kWh/m²/dia no Estado do Espírito Santo encontram-se no Labren, em download ou consulta da base de dados – Por

Estado, por meio do link http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html.

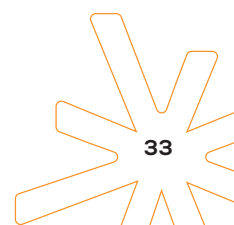
O mapa 1.4 apresenta a irradiação solar diária, média anual, no plano inclinado no Espírito Santo integrado com a infraestrutura energética. Observa-se que o Estado possui boa irradiação solar por sua localização tropical e que a variação da radiação incidente no plano inclinado está entre 4,64 e 5,40 kWh/m²/dia.

A tabela 1.3, com os dados do mapa de irradiação solar diária no Espírito Santo, no plano inclinado, média anual, traz os potenciais de geração anual em cada faixa (TWh/ano, terawatt-horas por ano), o potencial natural (TW), o percentual de área (%), a energia elétrica na rede em (GWh/ano) e a potência instalada (GWp) em 0,01% do território.

TABELA 1.3 Irradiação solar no plano inclinado no Espírito Santo, energia, potencial e área

IRRADIAÇÃO SOLAR ANUAL INCIDENTE (kWh/m ² .dia)	ENERGIA POTENCIAL (TWh/ano)	POTENCIAL NATURAL (TW)	AREA (%) (At = 46.095km ²)	ENERGIA POTENCIAL (GWh/ano)*	POTENCIAL* (GWp)
4,64 - 4,74	1.337,22	0,15	1,72%	133,72	0,02
4,74 - 4,84	8.891,93	1,03	11,16%	889,19	0,12
4,84 - 4,94	27.800,27	3,22	34,12%	2.780,03	0,32
4,94 - 5,04	2.7518,31	3,18	33,05%	2.751,83	0,32
5,04 - 5,14	9.856,95	1,14	11,59%	985,7	0,11
5,14 - 5,24	5.405,08	0,63	6,22%	540,51	0,06
5,24 - 5,40	1.902,28	0,22	2,15%	190,23	0,02
Total	82.712,05	9,57	100,00%	8271,2	0,96

Nota: *Potência natural para referência considerando 0,01% da área (uma parte em dez mil, para ser conservador).
 Fonte: Labren/Inpe. Base de dados de satélite de 1999 a 2015. Em http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html#mod.
 Tabela elaborada pela ARSP.



Verifica-se um potencial natural médio no ano de 9,57 TW (Terawatts = 1.000 Gigawatts), ou 9.570 GW, disponibilizando uma energia de 82.712 TWh/ano, levando-se em conta que a irradiação solar é nas 8.640 horas do ano. Já se considerar a irradiação solar local em doze horas diárias, o potencial demandado seria o dobro, 19.140 GW.

Isso possibilita uma potência física, por exemplo, em 0,01% do território (devido a restrições físicas de território, por reservas indígenas, quilombolas, preservação permanente, terras agricultáveis, entre outras), de 0,96 GWp (Gigawatts), disponibilizando energia potencial de 8.271 GWh/ano. Comparando, a potência instalada no Espírito Santo é da ordem de 2,0 GW.

Com foco nas faixas a partir de 5,04 (kWh/m².dia) e utilizando o 0,01% do território como referência, tem-se uma potência natural de 0,2GWp, com fornecimento de 1.716 GWh/ano de energia potencial, concentradas ao longo do litoral e proximidades, e em muitos setores no interior do Estado.

Este estudo sobre energia solar no Espírito Santo apresenta informações gerais sobre o potencial solar do Estado, além de técnicas de aproveitamento desse recurso e possíveis oportunidades para o comércio, agronegócio, residências e até mesmo para a indústria local e o setor público, de modo a contribuir para a disseminação de ações de eficiência energética e sustentabilidade por meio das fontes renováveis.

No que concerne à geração de energia elétrica, objetiva-se abordar tecnologias utilizadas para empreendimentos de grande e pequeno portes, dando enfoque na micro e minigeração, seus benefícios, custos de implantação, linhas de financiamento, incentivo fiscal, subsídios, formas de negócios, entre outros. Lembrando que esses empreendimentos de capacidade reduzida devem estar em concordância com a Resolução Normativa nº 482^{III}, de 17 de abril de 2012, elaborada pela

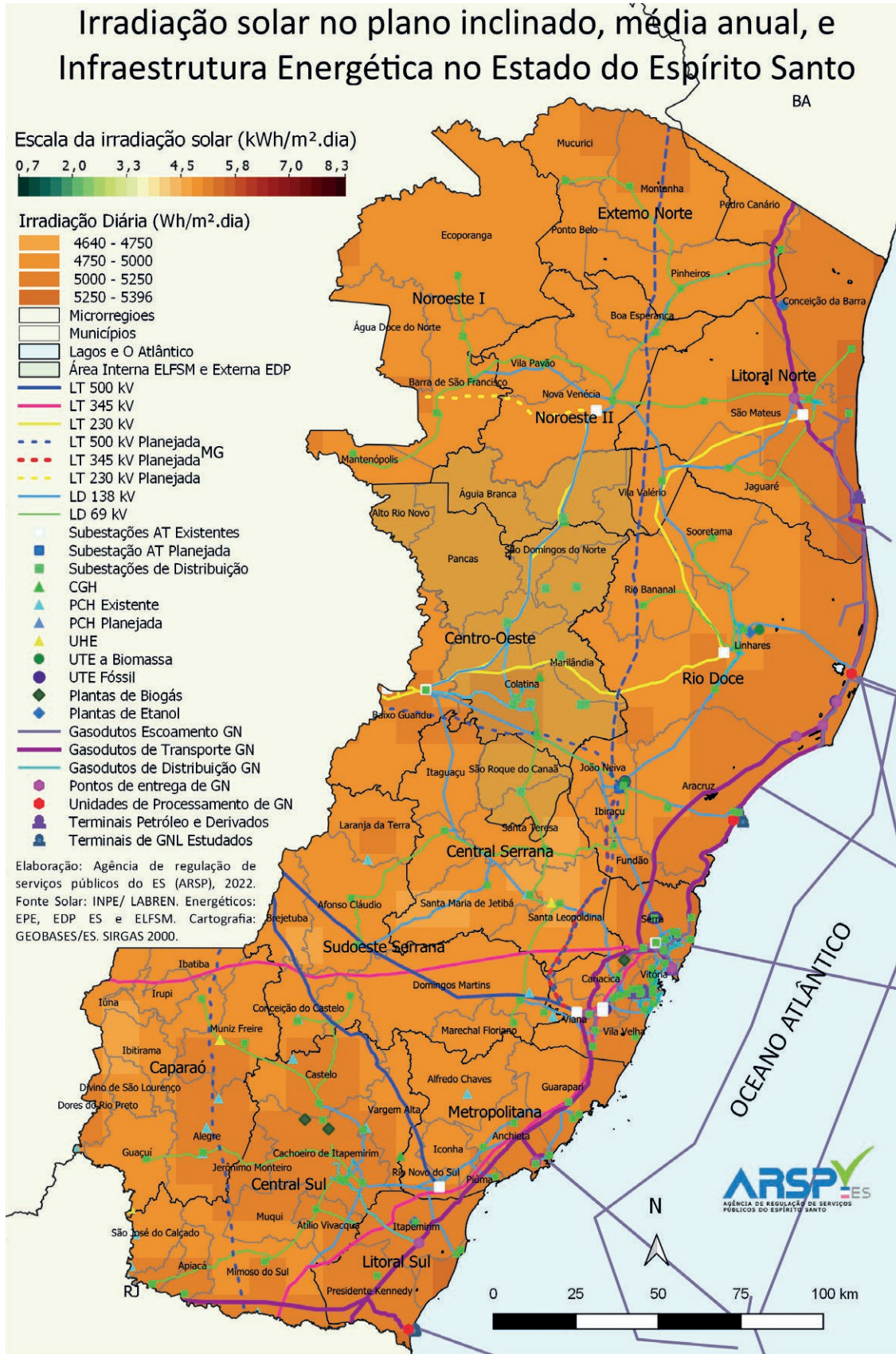
Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), e atualizações posteriores, a qual “estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências”. Cabe ressaltar que esta Resolução Normativa foi o propulsor de toda essa dinâmica de geração de energia solar distribuída e sua inserção na rede das concessionárias.

Além da importância atual no panorama energético e no desenvolvimento sustentável do Estado, o conhecimento envolvendo a radiação solar incidente, por exemplo, a meteorologia e a climatologia, é importante para áreas da atividade humana. No setor de agonegócios, é imprescindível no planejamento e obtenção da maior eficiência nas diversas etapas de produção: a seleção das culturas, o plantio, a colheita, incluindo o desenvolvimento e a operação de sistemas de irrigação de áreas e a secagem de grãos^{IV}.

Na arquitetura e na construção civil, as práticas de eficiência energética e de conforto térmico necessitam de informações confiáveis sobre a iluminação natural e o fluxo de energia solar. Isso se aplica também às diversas outras áreas, como em sistemas de conservação de alimentos, lazer, refrigeração e aquecimento em geral^V etc.

A seguir, é apresentada a tabela com a capacidade solar térmica instalada no Espírito Santo por meio do programa Bairro Solar, com os primeiros bairros a utilizarem energia solar no Estado. A implantação do Bairro Solar é uma ação da concessionária de energia elétrica EDP ES com o apoio do Governo do Estado do Espírito Santo, por meio da Agência de Regulação de Serviços Públicos (ARSP), utilizando recursos do Programa de Eficiência Energética das empresas de Distribuição de Energia Elétrica (PEE) estabelecido pela Aneel. Mais informações sobre o Bairro Solar serão apresentadas no item 10.4.

MAPA 1.4 Mapa da irradiação total diária no plano inclinado, média anual, e da infraestrutura energética no Espírito Santo



Fonte: Labren/Inpe para a irradiação solar e EPE, EDP ES e ELFSM para a infraestrutura energética. Mapa elaborado pela ARSP.

TABELA 1.4 Capacidade instalada solar térmica no Espírito Santo – Programa Bairro Solar

MUNICÍPIO	BAIRROS	UNIDADES RESIDENCIAIS	CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EVITADO (kWh)
Serra	Serra Dourada I, II e III	2.149	106.161
	Eldorado	218	10.769
	Novo Horizonte	179	8.843
Vila Velha	Jacarenema	288	14.227
	Jabaeté	909	44.905
Cariacica	Prolar	98	4.841
	Itanguá	240	11.856
Castelo	Cava Roxa	112	5.533
Vitória	Nova Palestina	26	1.284
	Estrelinha	21	1.037
Total		4.240	209.456
Potência Solar Térmica Instalada (KW_{th})			5.936

Obs.1: Adotou-se o consumo médio mensal de 190 kWh por residência. Verifica-se uma redução de 26% no gasto de energia com a instalação dos painéis.

Obs.2: Capacidade instalada solar térmica no Espírito Santo quando estiver totalmente concluído, por meio do Programa Bairro Solar.

Fonte: EDP ES. Adaptação pela ARSP.

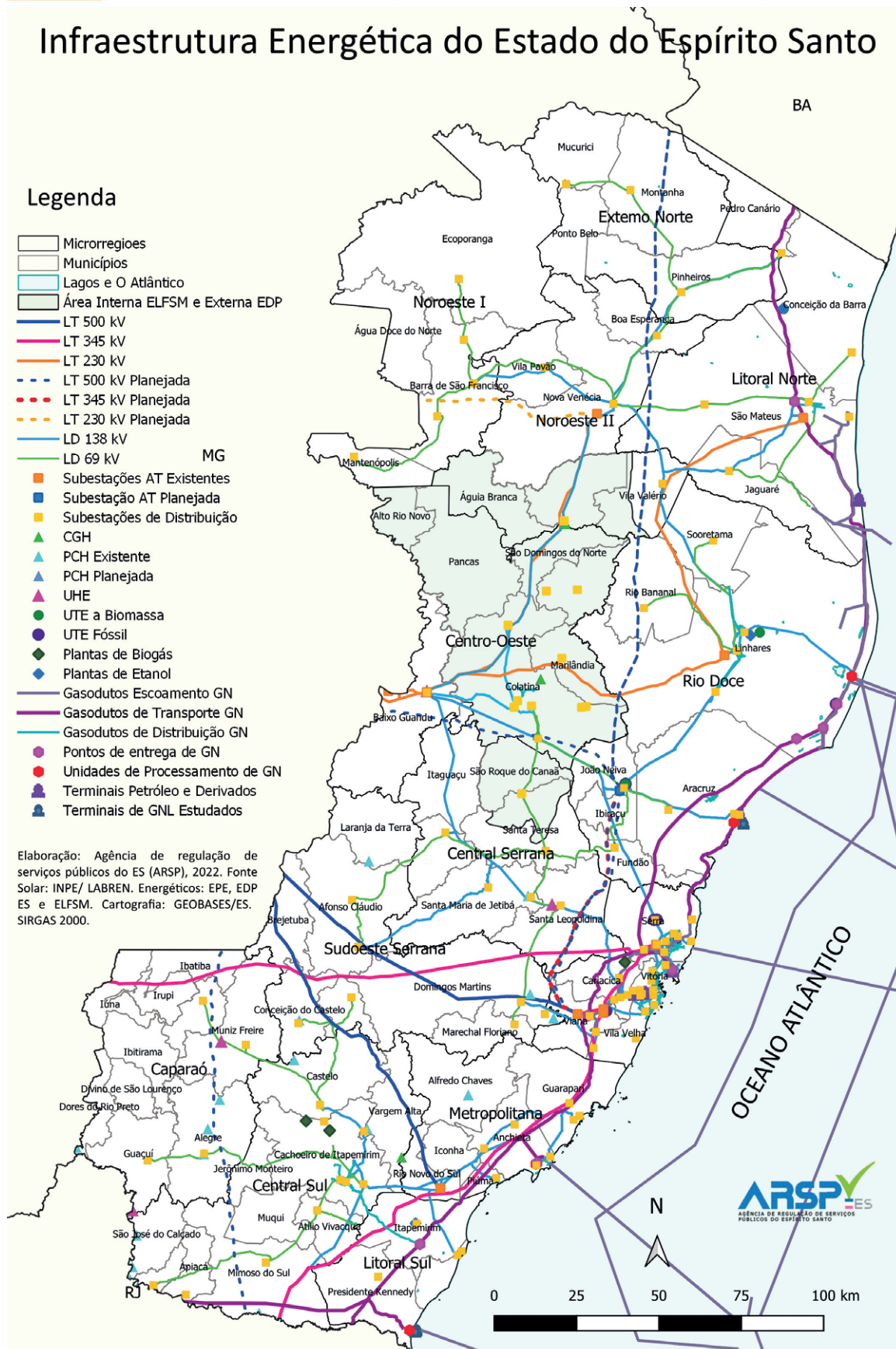
1.6.2 A infraestrutura energética do Espírito Santo

O mapa da infraestrutura energética do Estado usa as informações da EPE, do Inpe, das distribuidoras de energia (EDP ES e ELFSM) e a base cartográfica do Geobase/ES. O mapa de irradiação no plano inclinado é a base usada para referência da intensidade solar no Espírito Santo.

Apresenta-se o mapa da infraestrutura energética unido com o da irradiação no plano

inclinado, o mapa 1.3, para sobrepor a visão e relacionar o potencial solar ao setor energético local. Na sequência, o mapa 1.4 traz a infraestrutura energética do Estado sem a irradiação, contribuindo para uma melhor visualização da infraestrutura energética em si. Assim, propicia o uso de ambos os mapas para fins específicos individualmente.

MAPA 1.5 Mapa da infraestrutura energética do Estado do Espírito Santo



Fontes: Inpe/Labren, EPE, EDP ES, ELFSM e Geobases/ES. Elaboração ARSP em 2022.



CAPÍTULO

2.

Tecnologias para
o Aproveitamento
da Energia Solar

As principais tecnologias para o aproveitamento da energia solar são as utilizadas para aquecimento e geração de energia elétrica, destacando-se a geração fotovoltaica e a concentração solar, também chamada de Usina Solar Termoelétrica ou Heliotérmica.

A seguir, é apresentada uma análise detalhada acerca das tecnologias para esses três modos de uso do sol: aproveitamento térmico, fotovoltaico e concentração solar ou heliotérmica.

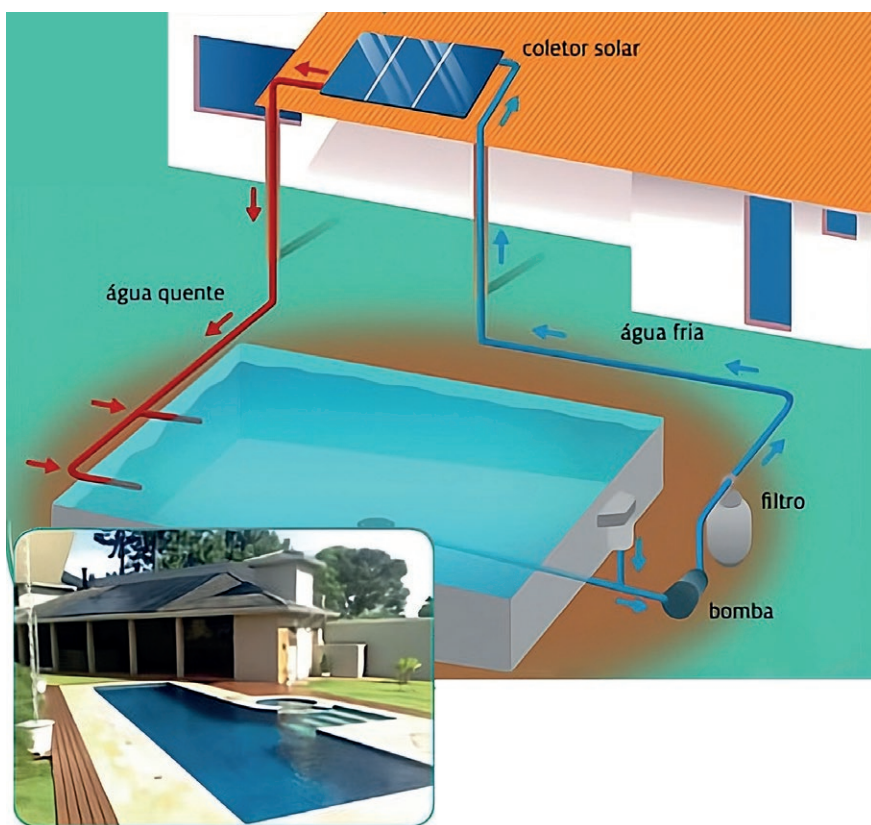
2.1 Tecnologia solar térmica para aquecimento

2.1.1 Tecnologia solar térmica no Brasil

É a forma mais primária para o aproveitamento da energia solar, tendo como principal utilização

o aquecimento de água nas residências, comércios, hotéis e pousadas.

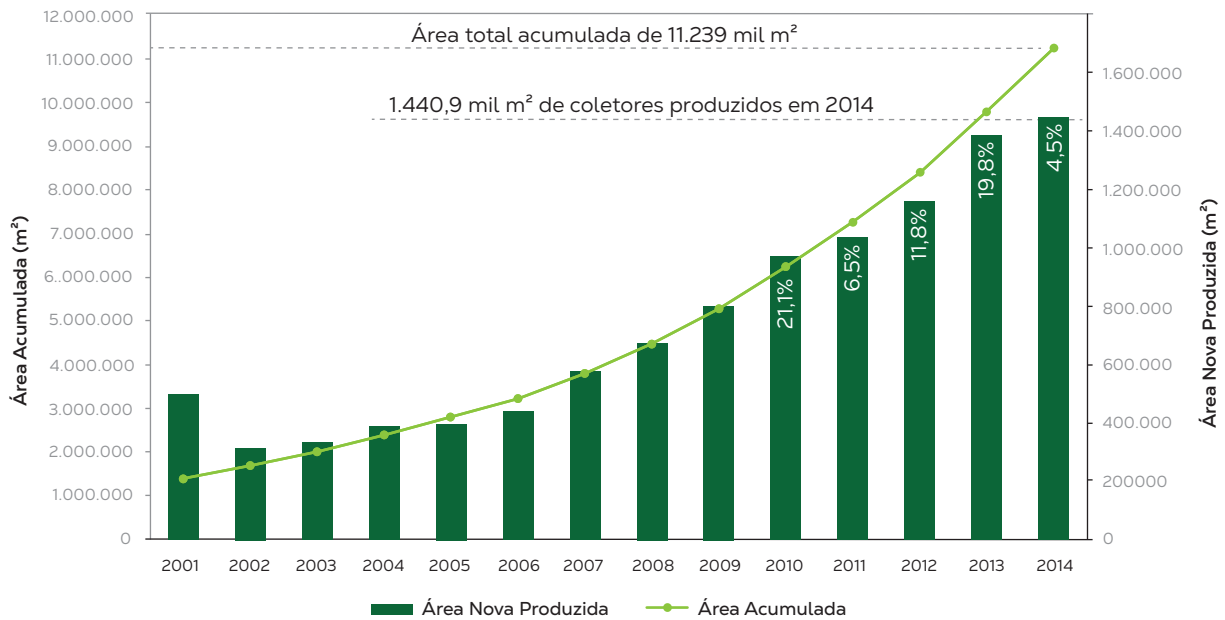
FIGURA 2.1 Diagrama e exemplo de sistema de aquecimento solar térmico residencial e comercial



Além de usos relativamente simples, o aquecimento solar pode prover calor para os mais diversos processos como água quente para lavagem e sanitização, aquecimento de tanques e reservatórios, secagem, pasteurização, refrigeração e preaquecimento de água de alimentação de caldeiras.

No Brasil^[78], tem-se a cada ano um aumento do aproveitamento solar para

aquecimento, como indicado no gráfico 2.1. A pesquisa sobre a produção de coletores solares (abertos, fechados e de tubo a vácuo) no País aponta que, em 2014, houve crescimento de 4,5% em relação ao ano anterior, sendo produzidos 1.440.870 m². A área acumulada de coletores solares no Brasil é de 11,24 milhões de m².

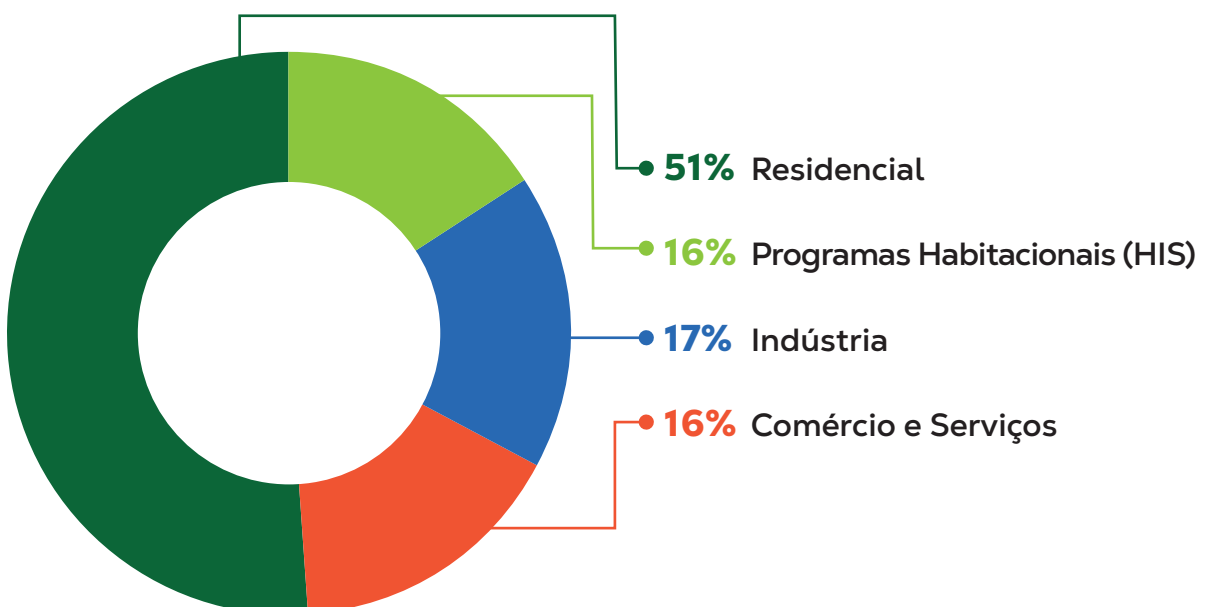
GRÁFICO 2.1 Evolução do mercado de aquecimento solar brasileiro


Fonte: Dasol/Abrava - Relatório de Produção – SAS 2014^[78], de maio de 2015. Acesso em 28 de maio de 2025. Não lançaram novos resultados.

NOTA: O Dasol – Departamento Nacional de Aquecimento Solar da Abrava congrega em todo o Brasil uma liderança focada na promoção, divulgação, desenvolvimento e adoção da energia solar térmica.

As vendas por segmento em 2014 são mostradas no gráfico 2.2, sendo o segmento mais atendido o residencial, com 51%, seguido pela

indústria, com 17%. Os setores programas habitacionais e comércio e serviços registraram igualmente 16% de participação.

GRÁFICO 2.2 Distribuição das vendas de aquecedores por segmento no Brasil – base 2014


Fonte: Dasol/Abrava - Relatório de Produção – SAS 2014^[78], maio de 2015. Acesso em 28 de maio de 2025.

Com a utilização da energia solar para fins de aquecimento no setor residencial, tem-se como benefício a redução no uso do chuveiro elétrico, que, no horário de ponta (18h às 21h), é um dos principais responsáveis pelo alto consumo da energia elétrica em residências. Durante o horário de pico, esse elevado consumo acarreta um aumento considerável da demanda. Já a diminuição desse consumo traz como vantagem o adiamento de investimentos no sistema de distribuição, uma vez que ocorrerá uma queda do carregamento da rede no horário de pico.

O Sistema de Aquecimento Solar (SAS) pode ser de dois tipos: convencional e híbrido. O tipo híbrido utiliza um sistema auxiliar para aquecimento (energia elétrica ou gás) nos dias em que o SAS não atinge temperaturas satisfatórias.

Os sistemas híbridos são, geralmente, adotados como padrão nas habitações de interesse social financiadas por instituições financeiras, companhias de habitação e projetos de eficiência energética em residências, elaborados pelas concessionárias de energia [56].

Segundo o Departamento Nacional de Aquecimento Solar (Dasol), com a instalação do

sistema de aquecimento solar pode-se chegar a uma economia de até 50% na conta de energia elétrica, dependendo dos gastos do estabelecimento com aquecimento. Esse benefício pode se estender por até 20 anos, que é a expectativa de vida útil desses equipamentos.

Os valores médios apontados pela Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos (Procel/Eletrobras) indicam que o gasto de energia elétrica para banho representa cerca de 26% do consumo total de uma residência da região Sudeste (consultar o capítulo 4).

A energia do aquecimento solar custa menos que a energia das termoelétricas^[79], além de produzir energia diretamente na casa do consumidor, com emissão zero de gases poluentes e redução expressiva de custo na conta de energia.

Usando como critério a sustentabilidade e a partir de uma comparação com outras fontes utilizadas para aquecimento de água, tem-se, segundo o Dasol^[79], que cada m² de coletor solar instalado, utilizado durante um ano, equivale às economias mostradas no infográfico a seguir.

FIGURA 2.2 Energia economizada de outras fontes com o uso de sistemas de aquecimento solar térmico, por m² instalado



Fonte: Abrava/Dasol 2014^[79]. Energia solar térmica. Participação na matriz energética e contribuições socioeconômicas ao Brasil.

2.1.2 Aplicações para aquecimento e sistemas de aquecimento residencial típicos

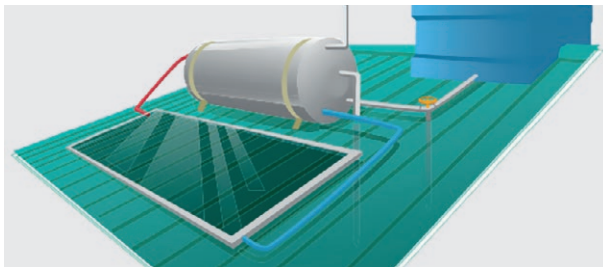
O sistema de aquecimento típico é composto por dois itens básicos: reservatório e coletor. O reservatório é constituído de um corpo interno, revestido por um material isolante (geralmente lã de vidro), que é onde a água ficará armazenada. Envolvendo o isolante, encontra-se uma cobertura de alumínio para proteção física do isolamento térmico. Todo o conjunto, com painéis e reservatório cheio, pesa cerca de 250 quilos, considerando um reservatório com uma capacidade 200 litros.

Portanto, para sua instalação em edificações, em construção ou existentes, deve ser verificado

se a estrutura suporta o peso do equipamento. No caso de instalações existentes, é necessário analisar se há possibilidade de adaptação do conjunto aquecedor ao sistema de encanamento instalado, de forma que seja possível ter um sistema híbrido. Assim, é aconselhável a visita de um técnico que analise a viabilidade de adaptação.

Quanto ao funcionamento, utiliza-se o sistema de termossifão, em que a água aquecida pelo coletor, “mais leve”, retorna para o reservatório, e a mais fria, “mais pesada”, desce para o coletor, fechando assim o ciclo. Mais informações são apresentadas no capítulo 4.

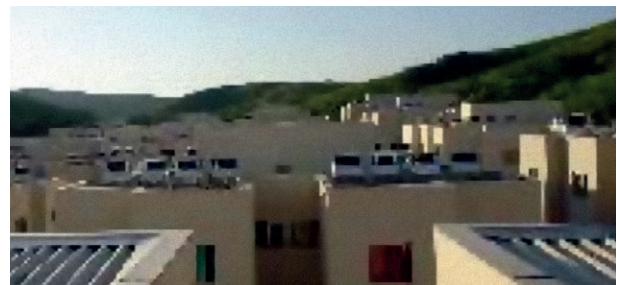
FIGURAS 2.3 Foto e esquema básico do conjunto para aquecimento solar em que o reservatório é alimentado pela caixa d'água



FIGURAS 2.4 Principais formas de aplicações da energia solar térmica nas edificações residenciais



Obras de grande porte



Condomínios verticais



Conjuntos habitacionais



Residências em geral

Fonte: Abrava/Dasol 2014^[79]. Energia solar térmica.

2.2 Tecnologia solar para geração de energia elétrica

2.2.1 Tecnologias fotovoltaicas

O efeito fotovoltaico^[80] foi verificado pela primeira vez pelo físico francês Alexandre-Edmond Becquerel em 1839 num eletrodo imerso em líquido condutor. Muitos outros pesquisadores continuaram esses estudos, culminando com a explicação matemática do fenômeno por Albert Einstein, em 1905, a qual lhe rendeu o Prêmio Nobel de Física de 1921.

Embora o efeito fotovoltaico esteja diretamente relacionado com o efeito fotoelétrico, trata-se de processos físicos diferentes^[80]. No efeito fotoelétrico, elétrons são ejetados de um material após sua exposição à radiação e consequente absorção de energia eletromagnética. Já no efeito fotovoltaico, os elétrons perturbados são transferidos entre bandas diferentes (i.e., das bandas de valência, onde estão coesos, para bandas de condução) dentro do próprio material, resultando no desenvolvimento de uma tensão elétrica entre dois eletrodos.

O efeito fotovoltaico consiste no fato de uma célula, constituída de duas camadas de elementos semicondutores dopados^[80,81], geralmente silício-n (dopado negativamente com Fósforo) e silício-p (dopado positivamente com boro), converter a radiação solar incidente em uma diferença de potencial nas extremidades da célula. Primeiramente, quando são unidas as duas camadas p e n, haverá um fluxo de elétrons em busca de preencher os furos e lacunas na camada p. À proporção que os elétrons (camada n) preenchem as lacunas da camada p, o fluxo tende a cessar. Assim, está montada a célula fotovoltaica.

Quando a luz atinge a célula e é absorvida^[80,81], os elétrons excitados são liberados e percorrem trajetórias aleatórias. Os elétrons numa região próximos da área da união, na junção-pn (zona de depleção), são impulsionados em direção ao campo elétrico E, sempre no sentido P-N (positivo para o negativo). Dessa forma, os elétrons vão percorrer o trajeto que estiver disponível

no interior da célula de modo a preencher as lacunas criadas na camada p, acumulando-se nela e formando uma diferença de potencial entre as duas camadas. A maneira para usar a corrente elétrica da célula é por meio de um condutor conectado às duas extremidades e à carga, como uma lâmpada, motor e eletrônicos. Na figura 2.5, a seguir, é apresentado um esquema com a corrente (em cor laranja) no sentido oposto ao do movimento dos elétrons.

Em 1883, foi construída a primeira célula fotovoltaica, cuja eficiência de conversão da energia solar em eletricidade era de apenas 1%. A eficiência de módulos comercializados chegou a 19% em 2011. Paralelamente ao aumento da eficiência, houve o barateamento da tecnologia. No início da década de 1970, o custo era de US\$ 100/Wp, e, no final de 2011, o custo de produção das células no mercado internacional foi abaixo de US\$ 1,00/Wp^[57,16]. Esses valores continuam reduzindo até o presente momento, e com expectativas de mais quedas.

O documento do Ipea^[82] destaca que os avanços tecnológicos recentes na área de semicondutores e o aumento da produção de células solares ajudaram a diminuir o preço de sistemas fotovoltaicos (FVs). Pode-se observar que o valor por watt de energia produzido caiu de US\$ 79,67/Wp para US\$ 0,36/Wp em 45 anos, de 1971 para 2015, e esses preços continuam baixando e com projeções de mais redução.

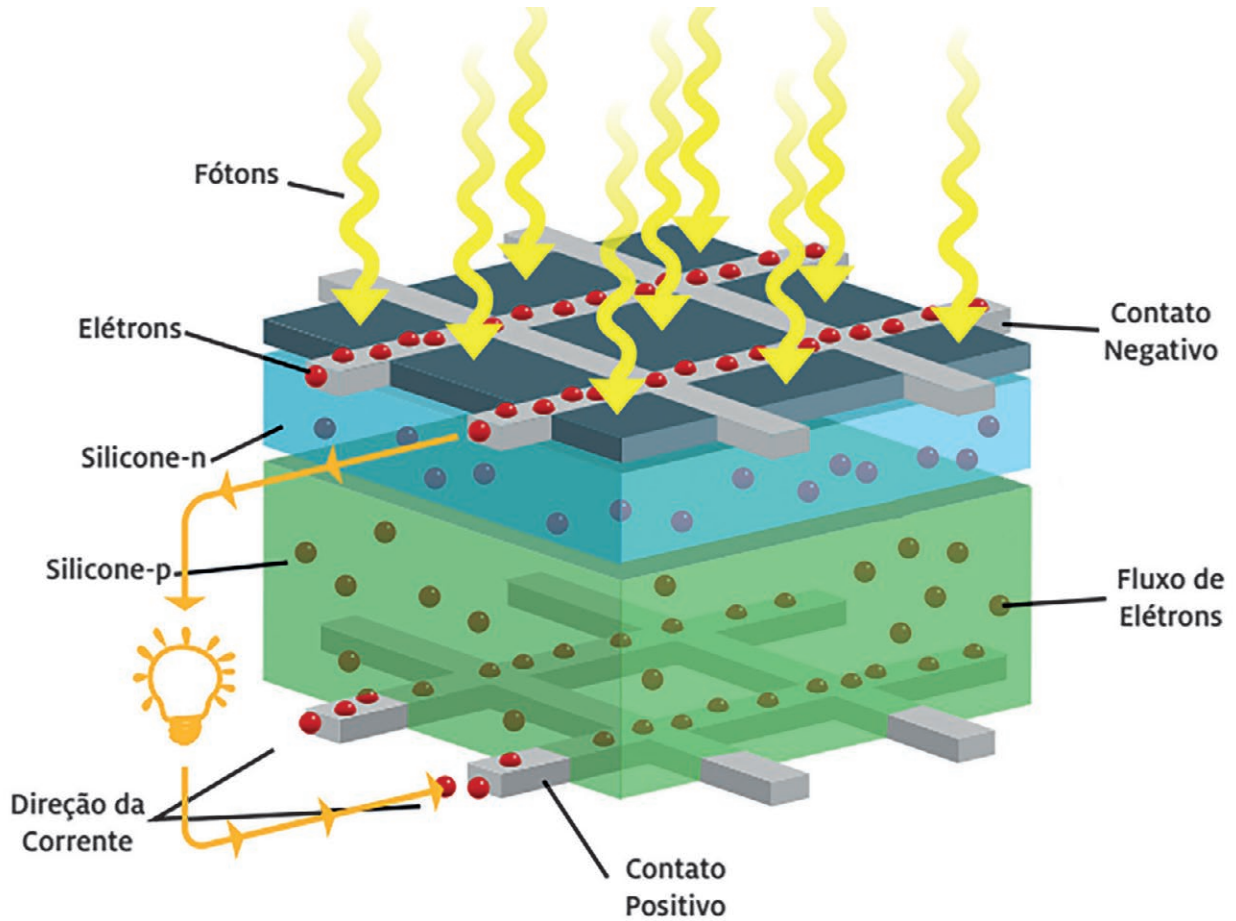
O principal fator que afeta o desempenho dessas células é a sua temperatura de trabalho (a qual decresce cerca de 1% ao ano), nebulosidade e inclinação, sendo que esses dois últimos afetam diretamente a irradiação solar sobre a célula.

As células fotovoltaicas são produzidas com cerca de 20 cm de diâmetro, fabricadas, principalmente, com tecnologia de primeira geração, conhecidas como silício cristalino,

e as de segunda geração, filmes finos. Existe também a tecnologia de terceira geração que utiliza concentrador fotovoltaico, mas este ainda tem seu uso incipiente. As células são

organizadas formando módulos, os quais, unidos, formam painéis, que são aplicados conforme suas características específicas [57,80], adiante.

FIGURA 2.5 Esquema de geração de corrente contínua por células fotovoltaicas



Fonte: Atlas Solar do Espírito Santo, 1ª Edição, figura ajustada. Nota: Em uma corrente elétrica, o sentido convencional da corrente será de oposição ao movimento dos elétrons. E é o campo elétrico na região da união, na junção PN, a ser atravessado pelos elétrons excitados pelos fótons.

FIGURAS 2.6 Exemplos de célula, módulo e painel fotovoltaico

a) Célula



b) Módulo



c) Painel fotovoltaico

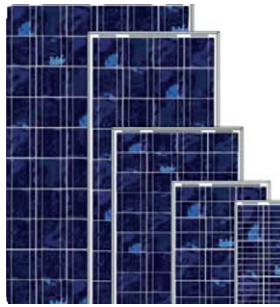


FIGURAS 2.7 Módulos com células de silício monocristalino, policristalino e filme fino

a) Silício monocristalino



b) Silício policristalino



c) Filme fino



2.2.1.1 Silício cristalino

As placas de silício cristalino são as mais utilizadas comercialmente, respondendo por 88% da fabricação de células. Apesar de possuírem maior eficiência, têm custos maiores de fabricação do que os filmes finos. Dividem-se basicamente em dois tipos, o mono e o policristalino^[57]. As mais caras são as constituídas de silício monocristalino, devido ao seu processo de produção e à quantidade de energia demandada em sua depuração.

Os materiais mais utilizados atualmente para a fabricação das células fotovoltaicas são o

silício monocristalino (31%), o policristalino (57%) e os chamados filmes finos: o silício amorfo e o silício microcristalino – ($\mu\text{c-Si}$) e ($\text{a-Si} + \mu\text{c-Si}$) – somam cerca de 3,4%, o telureto de cádmio (CdTe), 5,5% e o (dis) seleneto de cobre (gálio) e o índio (CIS e CIGS), que respondem por 2,4% dos materiais usados.

As placas mais caras são as de silício monocristalino, devido ao seu processo de produção e à quantidade de energia utilizada em sua depuração. Veja as imagens da figura 2.8.

FIGURA 2.8 Cilindro e placas de silício

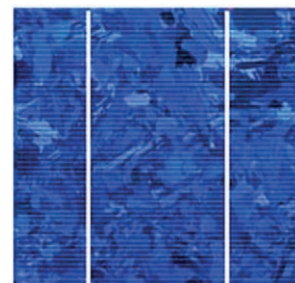
a) Cilindro de silício cristalizado



b) Placa de silício monocristalino



c) Placa de silício policristalino



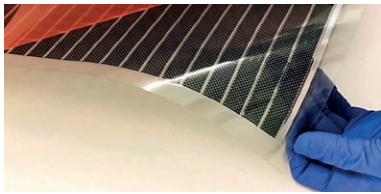
2.2.1.2 Filmes finos

Os filmes finos são representados principalmente pelo silício Cd-Te, material que responde por 5,5% da fabricação de células. São os mais indicados para regiões onde não há limitação de espaço, pois o rendimento dessa tecnologia é menor do que o dos módulos de silício cristalino, ocupando assim maior espaço para uma mesma capacidade de energia gerada^[57] ^[16]. Eles são a opção mais econômica, comparando-se com o silício cristalino,

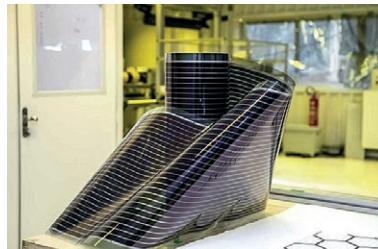
devido ao seu mais baixo custo de produção. Somando-se a isso, tem-se que essa tecnologia de construção pode ser facilmente incorporada a projetos arquitetônicos em função de suas características como flexibilidade e leveza. Em contrapartida, a eficiência desses painéis diminui mais acentuadamente nos primeiros meses após a instalação, embora seja menos afetada por temperaturas mais elevadas^[16].

FIGURA 2.9 Filmes finos fotovoltaicos (FV)

a) Filme fino FV (na mão)



b) Rolo de filme FV



c) Filme FV em instalação



A tabela a seguir indica a eficiência e a área necessária por kWp de placas^[16] para as tecnologias apresentadas.

TABELA 2.1 Tecnologias de placas fotovoltaicas - Eficiência típica dos módulos comerciais (m²/kWp)

TECNOLOGIA	EFICIÊNCIA	ÁREA/kWp
SILÍCIO CRISTALINO		
Monocristalino	13 a 19%	~7m ²
Policristalino	11 a 15%	~8m ²
FILMES FINOS		
Silício amorfo (a-Si)	4 a 8%	~15m ²
Telureto de Cadmio (Cd-Te)	10 a 11%	~10m ²
Disseleneto de cobre-índio-gálio (CIGS)	7 a 12%	~10m ²
CONCENTRADOR FOTOVOLTAÍCO	~25%	

Fonte: Nota Técnica Energia Solar – EPE/2012^[16].

A tabela 2.2, a seguir, mostra os avanços nas eficiências dos módulos comerciais de diversos fabricantes em 2015^[83].

TABELA 2.2 Eficiência típica dos módulos fotovoltaicos, comparação de % de eficiência

TECNOLOGIA	EFICIÊNCIA TÍPICA DE MÓDULOS COMERCIAIS	EFICIÊNCIA DOS MELHORES MÓDULOS (em laboratório)
SILÍCIO CRISTALINO		
Monocristalino	17 a 21,5%	22,9%
Policristalino	14 a 17%	18,5%
FILMES FINOS		
Silício amorfo (a-Si)	4 a 8%	10,9%
Telureto de Cadmio (Cd-Te)	10 a 16,3%	18,2%
Disseleneto de cobre-índio-gálio (CIGS)	12 a 14%	17,5%
CONCENTRADOR FOTOVOLTAÍCO	27 a 33%	38,9%

Fonte: EPE. Nota Técnica PR 07/18 – Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no Horizonte 2050^[83].

Pesquisas de mercado em 2025 mostram que painéis de silício monocristalino e policristalino têm as eficiências entre 15% e 22%.

2.2.2 Formas de aplicações da geração fotovoltaica

A geração fotovoltaica pode ser aplicada de forma centralizada ou distribuída, esta última de menor porte e localizada próximo à carga, variando desde micro ou miniunidades de geração residenciais até usinas solares com algumas

dezenas de megawatts. A geração distribuída tem como uma de suas vantagens a redução de perdas na distribuição e na transmissão. Aqui é abordado primeiro as formas de geração distribuída.

2.2.2.1 Geração distribuída fotovoltaica simples (Geração)

A geração distribuída, representada por unidades de geração em todas as classes consumidoras (residenciais e comerciais, rurais, industriais e públicas), pode ser feita nas configurações isoladas e nas conectadas à rede.

O sistema é dito isolado, ou *off-grid*, quando não está conectado à rede elétrica

da distribuidora de energia. É utilizado em regiões onde não há acesso à energia elétrica. A energia gerada pelos painéis normalmente é consumida diretamente por equipamentos específicos, como estações meteorológicas, lâmpadas em postes para iluminação e bombas de irrigação.

FIGURA 2.10 Instalações fotovoltaicas isoladas

A) Estação meteorológica



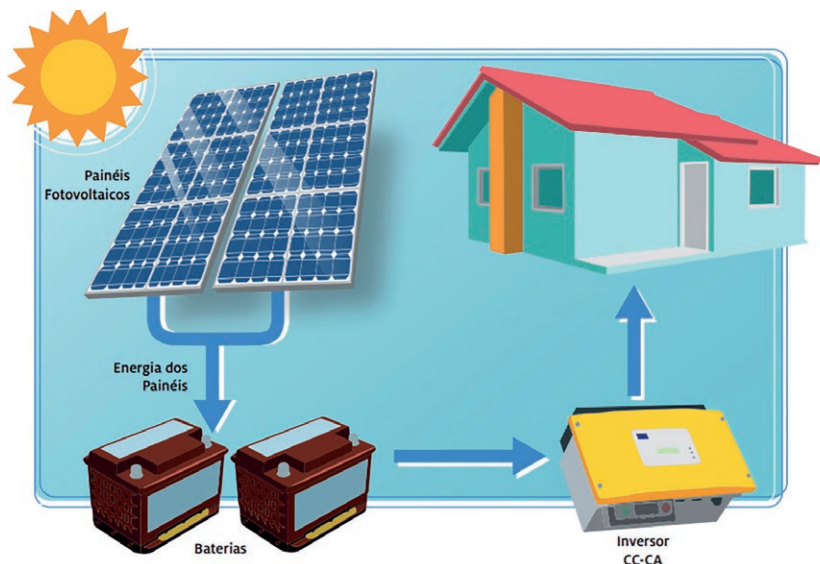
b) Iluminação pública



c) Bomba de água



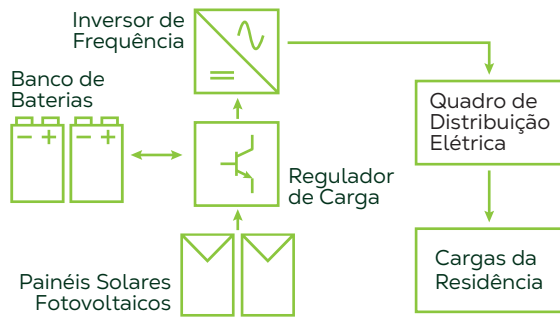
FIGURA 2.11 Infográfico de geração solar fotovoltaica em sistema isolado (*off-grid*)



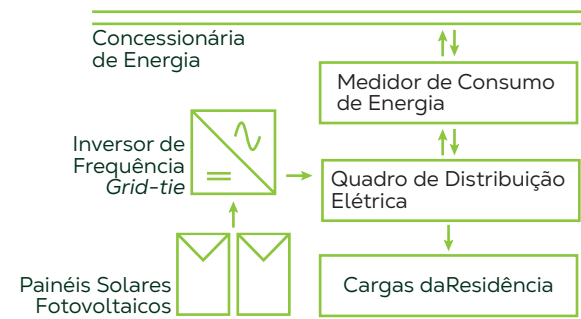
A configuração na qual a geração fotovoltaica opera juntamente com a rede elétrica que alimenta nossas edificações é conhecida como *on-grid* ou *grid-tie*. Ela injeta diretamente na rede o restante da energia gerada e não utilizada, não necessitando das baterias para armazenar a energia produzida.

FIGURA 2.12 Topologias dos sistemas de geração fotovoltaica *off-grid* e *on-grid*

a) Sistema isolado (*off-grid*)



b) Sistema conectado (*on-grid*)



2.2.2.2 Geração distribuída fotovoltaica híbrida, por meio de geração e armazenamento

Existem diversas topologias^[84] para um sistema de armazenamento de energia com geração solar. Vamos apresentar as duas principais alternativas, o acoplamento AC e o acoplamento CC.

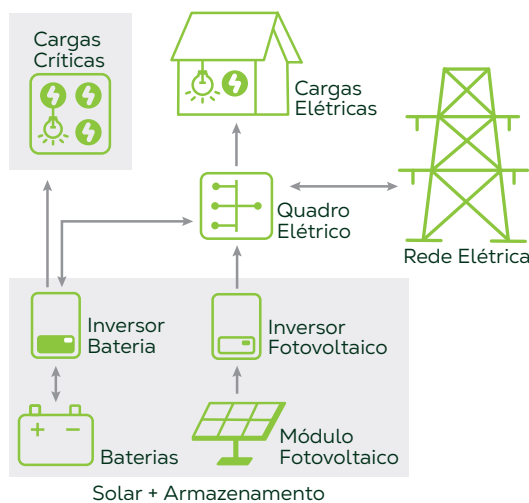
Acoplamento AC: a conexão entre sistema solar e de armazenamento é feita em corrente alternada após a saída do inversor. São necessários dois inversores, um para os módulos solares e outro para as baterias. A energia do sistema solar é transformada em alternada para alimentar as cargas ou ser injetada. Para carregar as baterias é convertida novamente em contínua. Ideal para onde já existem sistemas solares instalados com inversores fotovoltaicos *on-grid*.

Acoplamento CC: a conexão entre sistema solar e de armazenamento é feita em corrente contínua antes da entrada do inversor. Nesse caso, apenas um inversor é capaz de atender aos dois componentes do sistema, o que reduz o custo total e a complexidade da instalação do sistema. A energia solar pode ser diretamente armazenada nas baterias, reduzindo perdas por conversão. Indicado para sistemas novos.

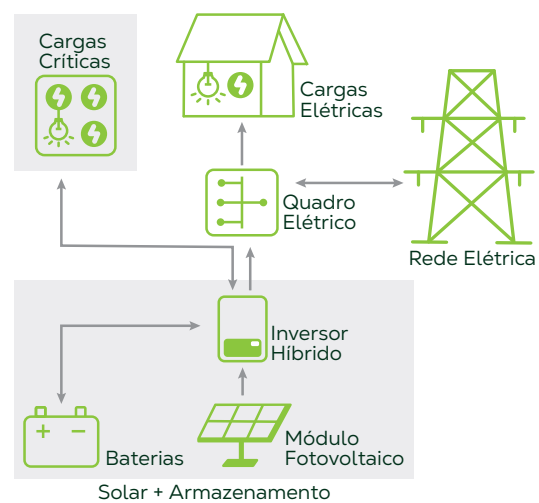
A figura 2.13 mostra os esquemas das duas topologias nos dois diferentes modos de acoplamento – AC e CC. Vale ressaltar: ambos os sistemas podem ser elaborados de modo *off* ou *on-grid*.

FIGURAS 2.13 Topologias dos sistemas de geração solar com armazenamento

a) Sistema com acoplamento AC

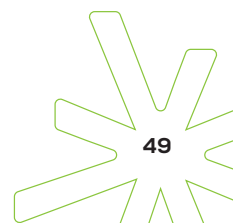


b) Sistema com acoplamento CC



Fonte: Greener^[85], 2020. Solar + Armazenamento Aplicações no Brasil.

NOTA: AC: Corrente alternada. CC ou DC: Corrente contínua.



ARMAZENAMENTO POR BATERIAS

A aplicação de tarifas horárias e de demanda para a baixa tensão incentiva a criação de novos modelos de negócio em que o armazenamento tem um papel central. Assim, as aplicações GD Solar + Armazenamento de energia passam a ser cada vez mais viáveis.

Os consumidores que já possuem o sistema de geração adicionam um sistema de baterias para evitar as perdas com a tributação

e por compensação. Os novos geradores podem adquirir o sistema solar mais o de armazenamento com o uso de inversores híbridos, reduzindo o custo de aquisição. O inversor híbrido tem a função de converter a energia proveniente das baterias e dos módulos fotovoltaicos.

As baterias são os dispositivos usados para elaborar um projeto fotovoltaico com a geração e o armazenamento. Compara-se, a seguir, as diversas tecnologias de baterias.

TABELA 2.3 As tecnologias de baterias e suas características

	CHUMBO ÁCIDO	ÍON DE LÍTIO	BATERIA DE FLUXO	SÓDIO-ENXOFRE	AR-ZINCO
COMPOSIÇÃO QUÍMICA	<i>Pb + H₂SO₄; Gel, AGM*, ALC**, Chumbo-carbono, ...</i>	<i>LFP, NMC, NCA, LTO, ...</i>	<i>Redox de vanádio, Ferro-Cromo, Zinco-Bromo, ...</i>	<i>Sódio-enxofre</i>	<i>Ar-zinco</i>
TEMPO DE DESCARGA	Flexível, pode ser otimizado para até 20 horas	Até 4 horas	4-10 horas	4-10 horas	> 7 horas
VIDA ÚTIL (CICLOS)	200 - 800	2,000 - 8,000	10,000 - 15,000	2,500 - 4,500	10,000 +
EFICIÊNCIA TOTAL	60% - 70%	85% - 98%	60% - 85%	70% - 90%	50 - 70%
DENSIDADE ENERGÉTICA	Baixa	Alta	Média	Elevada, mas muito pesada	Média
PREÇO (USD)	< \$ 100/kWh	< 200 \$/kWh c/tendência de queda	\$200-\$600 por kWh	\$500/kWh	\$160-250/kWh, com efeito escala
SEGURANÇA	Média	Baixa, probabilidade de 1ppm de incêndio	Não inflamável, mas vazamentos possíveis	Temperaturas internas elevadas	Sem risco
TOXICIDADE	Elevada	Média	Depende, p.ex. bromo muito tóxico	Média	Não tóxico
OBSERVAÇÕES	<i>Processos produtivos tóxicos</i>	<i>Requer gestão de temperatura</i>	<i>Problemas em ambientes serveros</i>	<i>Aplicações de tração</i>	<i>Não requer resfriamento</i>

Fonte: Greener^[85], 2020, de IFC / Peter Möckel. * AGM: absorbent glass matt ** ALC: advanced lead carbono.

NOTA: VERDE: Vantagem em relação às demais tecnologias. **CINZA:** Sem vantagem ou desvantagem.

VERMELHO: Desvantagem em relação às demais tecnologias.

A operação do primeiro sistema de armazenamento de energia em larga escala do País junto a uma usina fotovoltaica, com potência máxima de 1,26 MVA e capacidade de

armazenamento de 1,36 MWh, já é realidade em Uberlândia, no Triângulo Mineiro, MG. A iniciativa é fruto de uma parceria entre a Cemig e a Alsol Energia Renováveis, com baterias BYD.

FIGURA 2.14 Sistema de geração solar fotovoltaica com armazenamento por baterias


Fonte: Site da BYD Brasil, divulgação.

2.2.2.3 Geração centralizada fotovoltaica

A geração centralizada fotovoltaica é feita por empreendimentos de maior porte, com algumas dezenas de megawatts. São constituídos de milhares de painéis fotovoltaicos, denominados parque de geração fotovoltaica. O Brasil, em julho de 2024, alcançou uma potência instalada fotovoltaica (FV) outorgada por meio de registro ou autorização, de 14,3 GWp, como foi mostrado no tópico 1.5, com os

dados da Aneel/SIGA, equivalendo a 6,99% da capacidade elétrica instalada. O País tinha 138 usinas FV em construção, com potência de 6,0 GWp, e 2.773 com a construção não iniciada, cuja potência é de 112,4 GWp. No entanto, pode avançar muito em comparação com China, Japão, EUA e Alemanha, com dezenas de GW de potência instalada (ver gráfico 1.2).

FIGURA 2.15 Geração centralizada – usinas de geração centralizada solar fotovoltaica


2.2.3 Tecnologia de Concentração Solar (CSP)

Na Tecnologia de Concentração Solar (CSP), também chamada de heliotérmica, são utilizadas superfícies espelhadas (concentradores) que refletem a radiação direta incidente para uma região específica. Essa radiação concentrada é absorvida (absorvedor) com o objetivo de convertê-la em energia térmica. Para refletir a radiação sempre em um mesmo local, os espelhos necessitam acompanhar o movimento do sol.

No absorvedor é aquecido um fluido de capacidade térmica elevada, para então trocar calor em um reservatório de água e, assim, gerar o vapor que aciona uma turbina acoplada a um gerador de energia elétrica.

Entre as diversas configurações para geração heliotérmica, as mais aplicadas são o concentrador cilíndrico-parabólico e o concentrador em torre, os quais são utilizados principalmente em projetos de geração centralizada^[9].

2.2.3.1 Concentradores solar cilíndrico-parabólicos

Os concentradores cilíndrico-parabólicos utilizam espelhos côncavos, os quais refletem a radiação direta incidente sobre tubos coletores, por onde circula um fluido, de alta capacidade

térmica, que troca calor em um reservatório de água para geração de vapor e, conseqüentemente, geração de energia. Os detalhes estão nas figuras a seguir.

FIGURAS 2.16 Esquema e foto de uma usina solar com concentradores cilíndrico-parabólicos

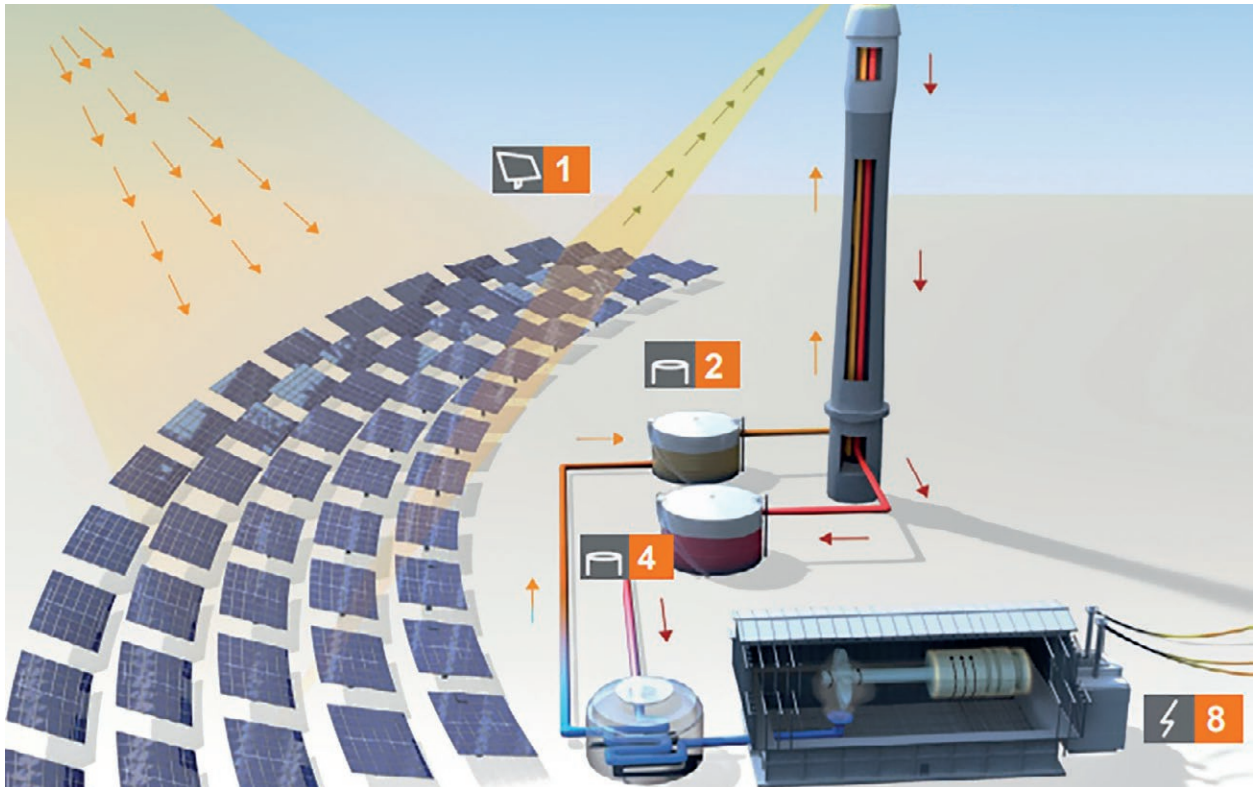


2.2.3.2 Concentrador solar em torre

O concentrador solar em torre tem um processo semelhante ao do concentrador cilíndrico-parabólico. No sistema de concentração em torre, são utilizadas grandes áreas para captação de radiação direta, que então é concentrada em uma área menor, gerando temperaturas muito elevadas – podem chegar

até 1.000C° no ponto da torre onde ocorre a concentração. Nesse local, o fluido é aquecido a altas temperaturas para posteriormente ser utilizado em um trocador de calor, com objetivo de gerar vapor para alimentar turbinas. O esquema e os exemplos são apresentados a seguir.

FIGURAS 2.17 Esquema e exemplo de uma usina solar com concentradores em torre



Fonte: Guia de licenciamento ambiental de heliotérmicas^[86]. Nota. 1. Helióstatos; 2. Tanque frio; 3. Torre central; 4. Armazenamento térmico; 5. Trocador de calor; 6. Turbinas; 7. Gerador; 8. Transformador.



Fonte: Abengoa (2012), pela Crebsep. https://cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=561.

NOTA: Foto das torres de concentração PS10 e PS20, PS10 (11MW) e PS20 (20MW), operando próximo à Sevilha, na Andaluzia, Espanha.

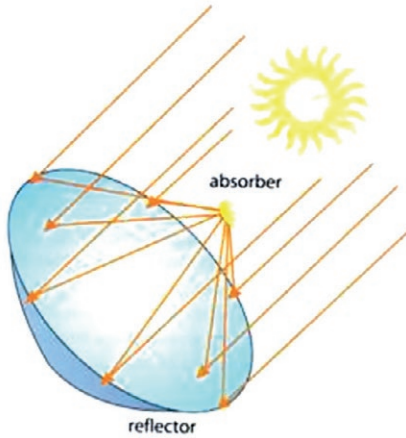
2.2.3.3 Concentrador solar por meio de disco parabólico

O disco parabólico é um concentrador de foco pontual^[86], conforme o diagrama e as instalações apresentados nas figuras a seguir. O disco

rastreia o sol em dois eixos, e assim é capaz de apontar diretamente para o sol desde o nascer até o poente (KALOGIROU, 2009).

FIGURAS 2.18 Concentrador solar por meio de disco parabólico

a) Esboço do concentrador



b) Disco concentrador



c) Sistema com o disco concentrador

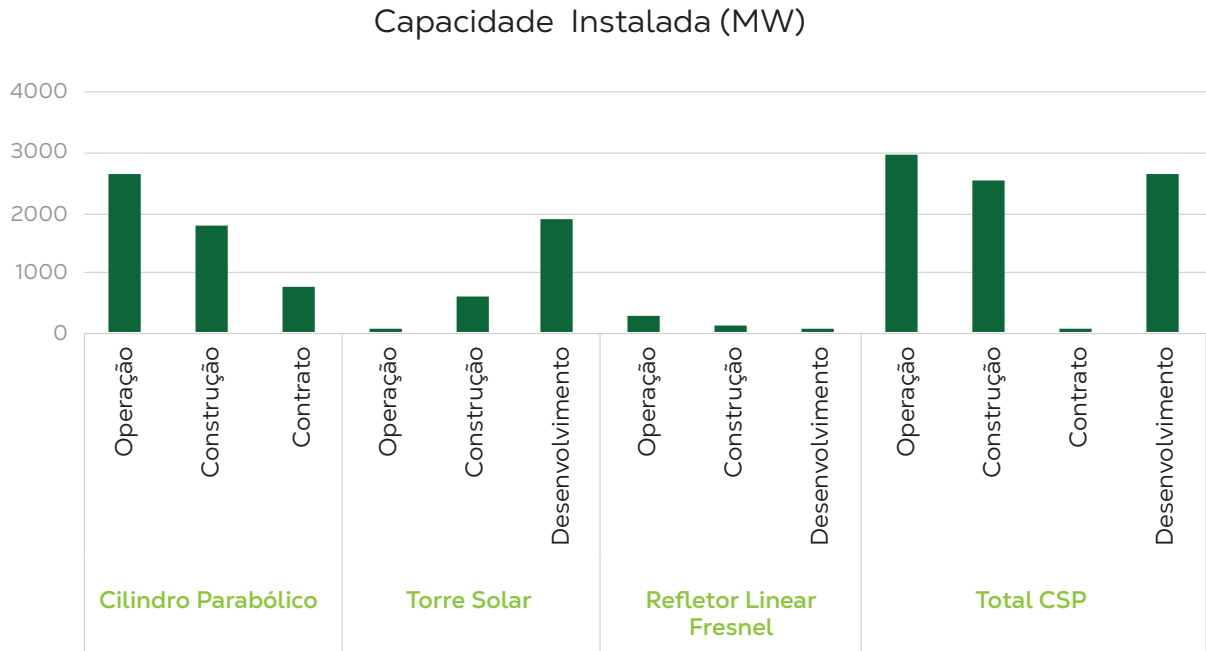


NOTA: a) Esboço de um concentrador de disco parabólico. Fonte: DGS (2005). b) Foto de um concentrador de disco parabólico. Fonte: Global Nevadacorp (2011). c) Foto de um Sistema de Disco Parabólico. Sisema.

No mundo ^[86], mesmo considerando a ampla vantagem em termos de capacidade instalada das calhas parabólicas, os projetos de torres solares emergem como alternativa segura com o desenvolvimento de

projetos na ordem de quase 2.000 MW de capacidade instalada em 2013. Discos parabólicos têm pouca relevância nesse cenário (4 MW, sendo 2 MW operando e 2 MW em desenvolvimento).

GRÁFICO 2.3 Capacidade instalada de usinas solares heliotérmicas no mundo segundo tecnologia e status da planta (MW)



Fonte: Guia de Licenciamento Ambiental de Heliotérmicas^[86]. MMA.



CAPÍTULO

3.

Sistemas de Micro
e Minigeração
Fotovoltaica de
Energia Elétrica

3.1 Resolução Normativa 482/2012 da Aneel e Lei nº 14.300, de 06 de janeiro de 2022

A entrada em vigor da Resolução Normativa nº 482, lançada pela Aneel em 2012, e com regulamentações posteriores que veremos adiante, introduziu a oportunidade para a inserção da energia solar na matriz energética nacional, na forma de micro e minigeração.

O incentivo ocorre, principalmente, devido à simplificação do processo de registro como gerador de energia elétrica ^[16]. A resolução é o pilar fundamental para incentivar e promover o uso da energia fotovoltaica na forma de geração distribuída. Essa norma estabelece considerações quanto à classificação da unidade geradora ^[3], de acordo com a tabela 3.1.

TABELA 3.1 Geração Distribuída (GD), até 5 MW, conforme a Resolução Normativa nº 482 e Lei nº 14.300, de 06 de janeiro de 2022

TIPOS DE GERAÇÃO	POTÊNCIA (kWp) (Capacidade de geração)
Microgeração	Até 75
Minigeração	75 a 5.000

Na resolução, é definida a forma do Sistema de Compensação de Energia, o *net-metering*. Nesse sistema, toda energia injetada na rede, ou seja, a energia gerada menos a consumida no mesmo ciclo de faturamento, servirá de créditos para serem abatidos nas contas futuras, da própria unidade onde está a geração ou da unidade consumidora em outra localidade, desde que esteja cadastrada para esse fim e possua o mesmo CPF ou CNPJ, além de estar na mesma área de concessão.

Os créditos serão acumulados até um prazo de 60 meses. Vencido o prazo, esses créditos serão repartidos com os demais consumidores da área de concessão. Resumindo, o sistema de compensação estabelece que os consumidores que tiverem mais de um imóvel ou filial comercial e possuírem unidade geradora, em um deles ou em ambos, poderão abater os créditos de

energia injetada na rede em fatura de um dos imóveis, desde que o mesmo esteja cadastrado com o mesmo CPF ou CNPJ.

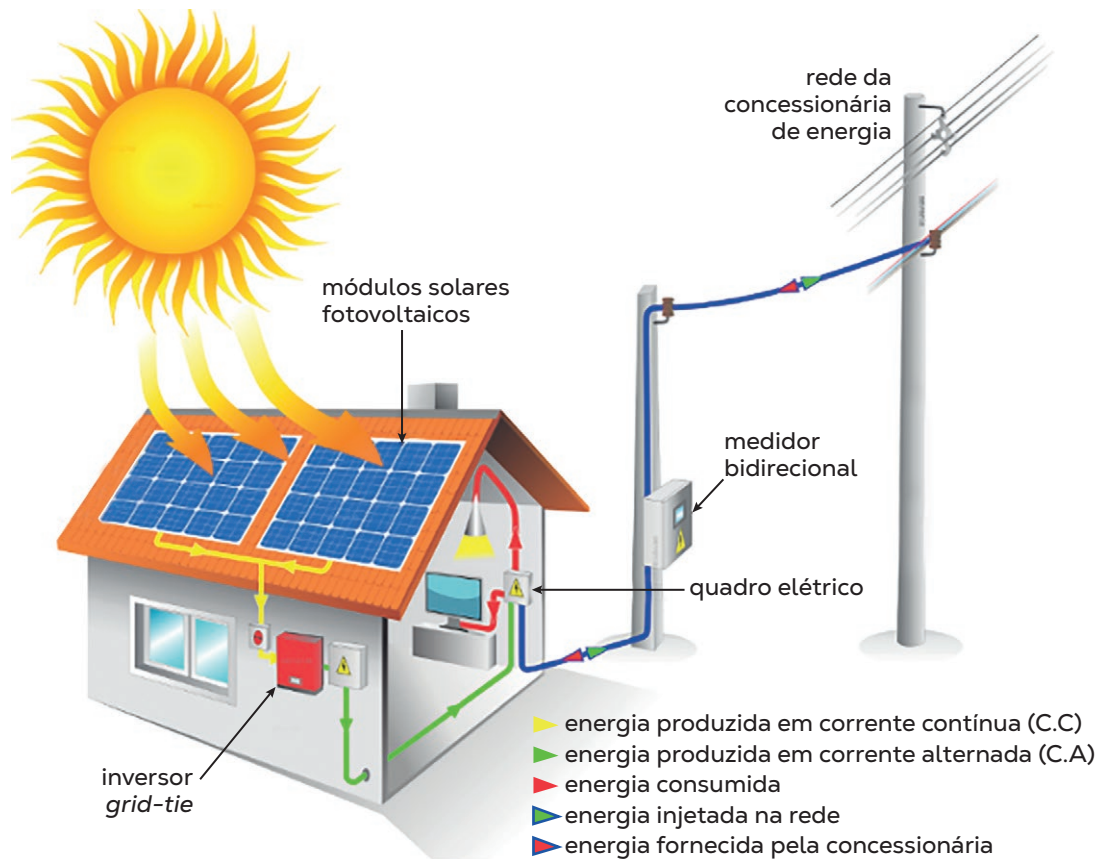
A seguir, são abordados aspectos básicos relacionados à estrutura e aos equipamentos necessários para instalações de micro e mini unidades geradoras fotovoltaicas típicas em ambientes residenciais, rurais e comerciais, principalmente.

Os componentes básicos de um sistema fotovoltaico (FV) são:

- **MÓDULOS FOTOVOLTAICOS** para a transformação da energia solar em energia elétrica, no modo Corrente Contínua (CC).
- **INVERSOR** ou inversor *grid-tie*. Possui duas funções: transformar a energia gerada pelas placas fotovoltaicas (CC) na forma que é utilizada nas casas, ou seja, Corrente Alternada (CA) e realizar a conexão do sistema fotovoltaico com a rede de energia da concessionária de forma segura. Deve-se observar a utilização somente de inversores *grid-tie* com certificação Inmetro ou inversores em processo de conclusão de etiquetagem que possuam certificados de laboratórios internacionais acreditados pelo Inmetro, já que é fundamental manter a segurança e a qualidade da energia da rede.
- **MEDIDOR**: equipamento para medir a energia total consumida da rede e a injetada, que é a consumida menos a gerada, em um dado momento.

Destaca-se que, de acordo com Módulo 3 do Prodíst, Revisão 5, para instalações em baixa tensão, a medição bidirecional pode ser realizada também por meio de dois medidores unidirecionais: um para aferir a energia elétrica ativa consumida e outro para a gerada.

FIGURA 3.1 Esquema típico de um sistema de microgeração fotovoltaica



Fonte: site Energiaeco.

Na prática, o sistema fotovoltaico *on-grid* em residências, sítios e comércios opera da seguinte forma: durante o dia, geralmente há forte incidência de luz solar e baixo consumo de energia. Desse modo, os painéis estão produzindo uma quantidade maior do que a residência necessita, sendo o excesso injetado na rede para ser utilizado por outros consumidores. Durante a noite, não haverá energia gerada, porém se tem consumo, para suprir essa demanda busca-se a energia da rede. Ao longo do dia, se o montante de energia gerado for maior do que o

consumido, serão gerados créditos que poderão ser utilizados para abater consumos futuros.

A resolução foi atualizada pela Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022, a qual institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis nºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências. A lei foi regulamentada posteriormente pela Resolução Aneel 1059/2023.

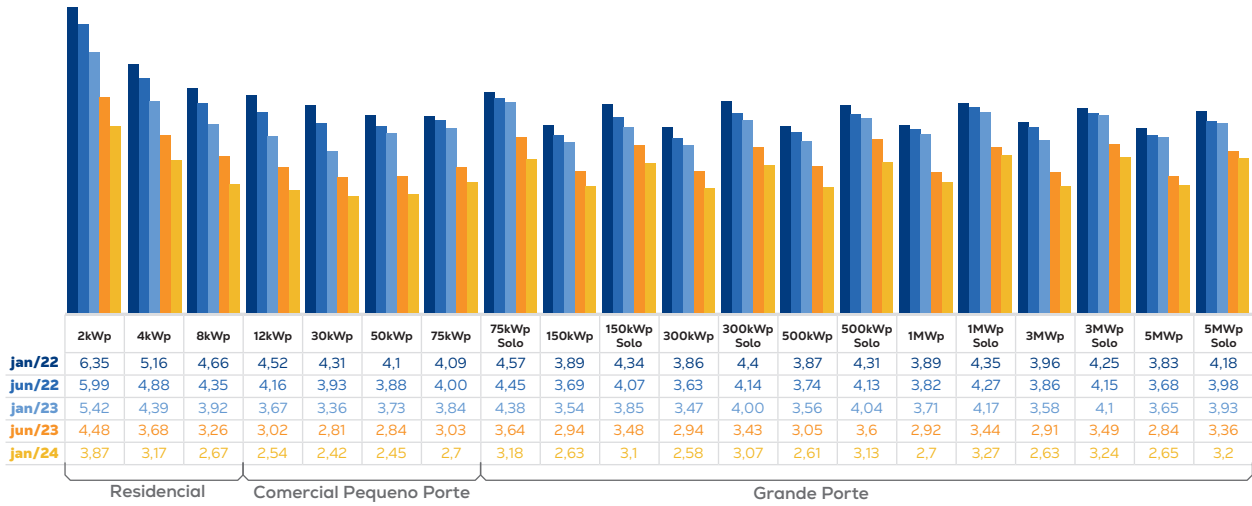
3.2 Custos médios para sistemas de microgeração fotovoltaica

A seguir, são apresentados como variaram semestralmente os custos médios para a instalação de diferentes tamanhos de sistemas de geração distribuída fotovoltaica no País ^[87] e,

por consequência, no Estado do Espírito Santo, entre janeiro de 2022 e janeiro de 2024.

Verifica-se decréscimo nos preços médios em todo o período.

GRÁFICO 3.1 Custos de investimento em sistemas fotovoltaicos – média Brasil, em mil R\$/kW

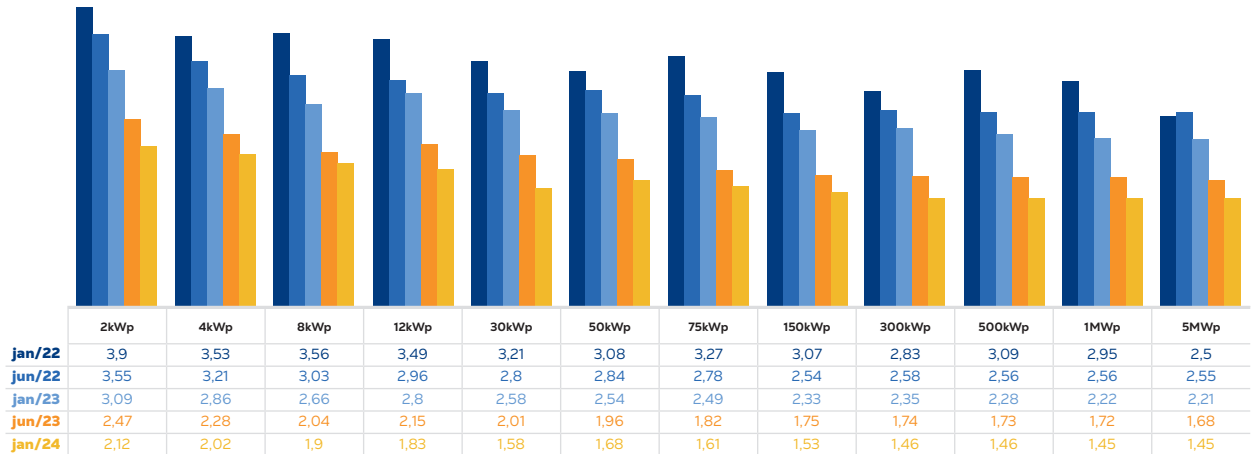


Fonte: Greener^[87], janeiro de 2024. Adaptado pela Arsp em 01 de julho de 2024.

Observa-se que os preços em média para o cliente final de sistemas de micro GD em janeiro de 2024 apresentaram queda de 30% em relação

a janeiro de 2023, sendo a redução do preço do módulo o principal fator de influência. Os portes maiores, de mini GD, apresentaram queda de 24%.

GRÁFICO 3.2 Custos de investimento em kits fotovoltaicos – média Brasil em mil R\$/kWp



Fonte: Greener^[87], janeiro de 2024. Adaptado pela ARSP em 01 de julho de 2024. Nota: kits: considerou-se compostos pelos painéis, inversores e sistemas de montagem.

Os kits fotovoltaicos tiveram redução média de 34% em relação a janeiro de 2023, sendo a redução, em geral, mais acentuada em sistemas de menor porte.

Além da redução dos custos dos equipamentos, a queda dos preços no varejo foi potencializada pela baixa demanda do mercado e pelo alto volume de estoque dos distribuidores, principalmente no primeiro semestre de 2023.

Ao descontar os preços dos kits fotovoltaicos do preço final, encontram-se os custos dos

serviços de projeto, montagem e instalação. O preço médio do serviço de integração em micro GD mostrou uma queda de 22% em janeiro de 2024 em relação a janeiro do ano anterior. Já em mini GD (acima de 75 kWp), o preço médio dos serviços de integração teve uma queda de 10% em relação ao mesmo período.

Obs.: Os preços de equipamentos podem variar consideravelmente de acordo com o fabricante, o volume de estoque do fornecedor e os locais de onde são importados.

3.3 Procedimentos para a implantação de um sistema de geração fotovoltaica

Para participar do Sistema de Compensação de Energia (*net-metering*), deve-se projetar o microgerador fotovoltaico de modo que ele atenda à necessidade energética da edificação na medida certa, gerando, no máximo, a energia anual consumida^[59], caso o consumidor não queira acumular créditos.

O projetista do sistema precisa conhecer o local onde será instalado o gerador, para avaliar as condições físicas e definir o microgerador a ser instalado^[59].

Isso inclui especificar os equipamentos mais adequados (tipo, modelo e quantidade de módulos fotovoltaicos e inversores), como os módulos fotovoltaicos devem ser ligados, qual o melhor posicionamento para garantir a melhor eficiência em relação ao norte verdadeiro, qual a melhor estrutura para fixação dos módulos e se serão necessárias obras estruturais para, por exemplo, suportar o peso do sistema ou para proteger o telhado^[59].

Além desses itens, o projetista deve observar a adequação às normas da distribuidora e do Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica (Prodist – Aneel), a Resolução Normativa 482/2012 e atualizações.

Existe uma grande variedade de soluções tecnológicas para geração de eletricidade solar fotovoltaica em sistemas de pequeno porte. Para tanto, o projetista deverá preparar um projeto das instalações de geração e da conexão à rede da concessionária.

A seguir, são apresentados, em linhas gerais, os passos a serem seguidos pelo projetista na instalação de uma unidade geradora residencial do tipo microgeração para a etapa de acesso. Lembrando que a primeira ação a ser realizada é entrar em contato com a sua concessionária de distribuição (EDP Escelsa ou ELFSM), que orientará o solicitante sobre os procedimentos a serem seguidos, os quais podem variar de acordo com cada caso. O início do contato pode ser feito em uma

das agências de atendimento das concessionárias.

Os seguintes passos devem ser seguidos pelo cliente ou projetista:

1 - ELABORAÇÃO DO PROJETO

Primeiramente, o interessado deve elaborar um projeto a ser apresentado à concessionária.

2 - SOLICITAÇÃO DE ACESSO

Fazer um pedido de acesso ao sistema da distribuidora, juntamente com a apresentação do projeto e documentação exigida.

3 - PARECER DE ACESSO

Após a solicitação de acesso, a distribuidora emitirá um parecer sobre a documentação apresentada, as condições da rede e as condicionantes que devem ser atendidas pelo acessante.

4 - RELACIONAMENTO OPERACIONAL

Após o atendimento das condicionantes do parecer, o usuário deverá formalizar o relacionamento operacional junto à distribuidora. Esse documento estabelece as condições para garantir a operação segura das instalações elétricas que interligam o microgerador ao sistema da distribuidora.

5 - REALIZAÇÃO DAS OBRAS

Após a assinatura do relacionamento operacional e a adesão ao sistema de compensação, o acessante poderá iniciar a realização das obras, que, quando terminadas, deverão ser vistoriadas pela concessionária.

6 - VISTORIA TERMINADA

Ao terminar a execução do projeto, o acessante deve solicitar à concessionária uma vistoria nas obras, para verificar se está de acordo com os padrões da concessionária. A conexão com a rede e a consequente energização do sistema de geração nunca devem ser feitas antes da vistoria e aprovação da concessionária. Estando aprovada, a conexão poderá ser realizada pela distribuidora.

NOTAS^[59] Os custos da adequação feitos pela distribuidora no sistema de medição serão de responsabilidade do cliente microgerador (prosumidor: produtor e consumidor do próprio insumo). Para realizar a medição, podem ser utilizados dois medidores convencionais unidirecionais, que terão, juntos, o mesmo papel de um medidor bidirecional, necessário para medir a energia injetada e a consumida da rede. Instalado o medidor, a concessionária será a responsável por sua manutenção e operação.



CAPÍTULO

4.

Estimativas
para projetos
típicos de uso da
energia solar no
Espírito Santo

4.1 Sistema fotovoltaico residencial

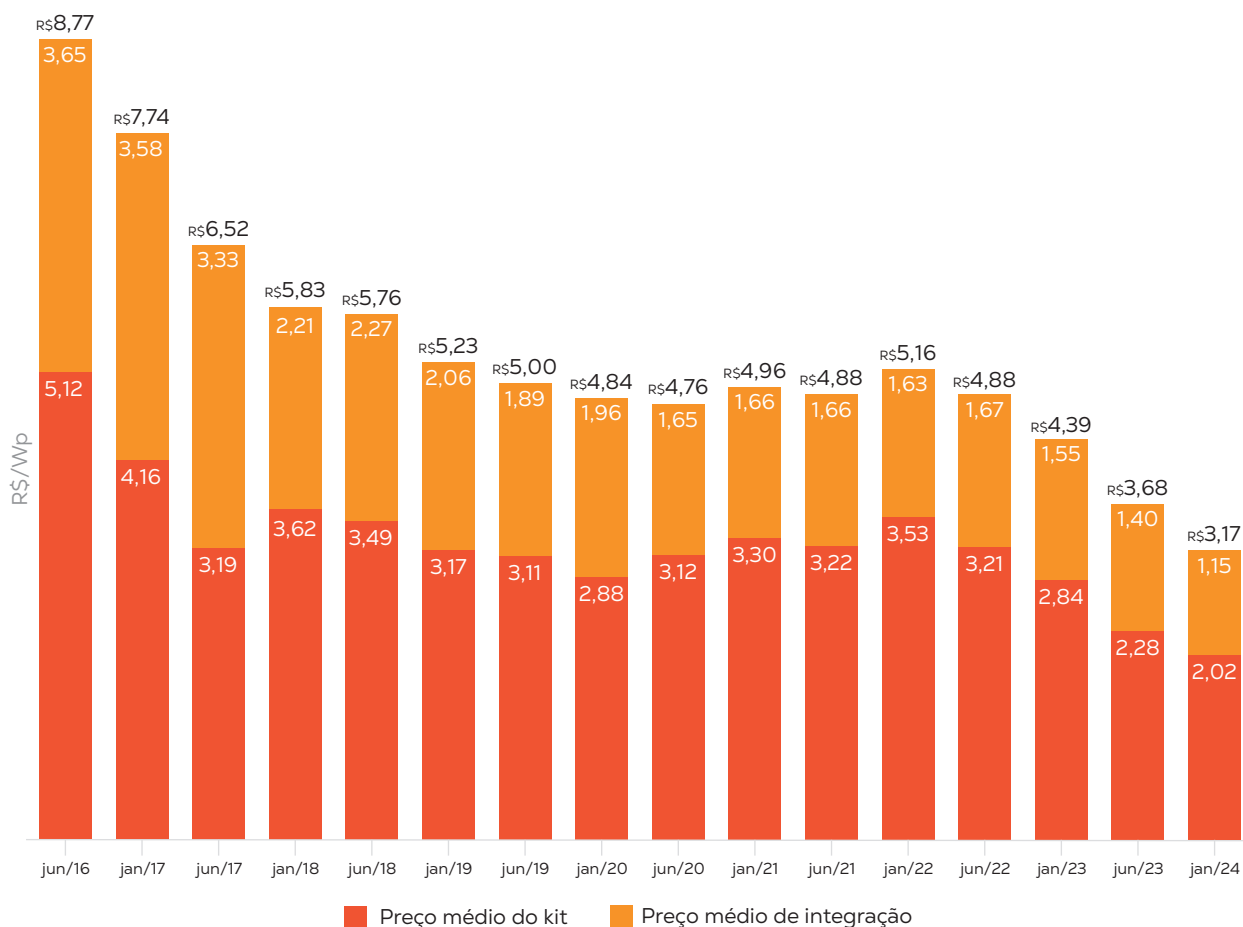
A seguir, são apresentadas estimativas sobre a instalação de geração fotovoltaica residencial, considerando como referência uma residência que consome em média 190 kWh/mês e que uma casa atendida com sistema monofásico dispõe de uma taxa mínima de 30 kWh/mês de disponibilidade.

Outro ponto a ser destacado foi a consideração de dados médios de radiação por microrregião. Devido à pequena variação de radiação média incidente entre as microrregiões, que variam de 4,6 a 5,4 kWh/m².dia (plano inclinado), calcula-se que um sistema com aproximadamente 10,5 m² (5 a 6 placas) e 1,4 kWp seja suficiente para atender à demanda residencial típica em qualquer microrregião do Estado.

A evolução do preço de um sistema FV residencial típico, de 4kWp, pode ser vista pelo gráfico 4.1, reduzindo para R\$ 3.170,00/kWp, em janeiro de 2024, levando o custo médio de um sistema com 1,4kWp de potência instalada, na tabela 4.1, a decrescer para R\$ 4.440,00, já instalado. Outras informações sobre os procedimentos e o dimensionamento de sistemas fotovoltaico se encontram no Apêndice B.

Verifica-se que o preço médio do sistema residencial em janeiro de 2024, teve queda de 28% em relação a janeiro de 2023 e queda de 14% em relação a junho. O preço médio da usina FV residencial, de 4 kWp era R\$ 12.680,00, frente a R\$17.560,00 em janeiro de 2023. A participação (%) dos serviços de integração se manteve estável apesar da queda do preço dos sistemas FV.

GRÁFICO 4.1 Evolução do preço de um sistema fotovoltaico residencial de 4kWp (R\$/kWp)



Fonte: Greener^[87], janeiro de 2024. Adaptado pela ARSP em julho de 2024.

TABELA 4.1 Custo médio de um sistema fotovoltaico residencial com potência de 1,4kWp (R\$/kWp)

EQUIPAMENTOS	CUSTO*(R\$/kWp)	CUSTO DE 1,4kWp (R\$)
Kit (placas, inversores e sistema de montagem)	2.020,00	2.828,00
Montagem e instalação	1.150,00	1.610,00
TOTAL	3.170,00	4.438,00

Fonte: Greener⁽⁸⁷⁾, janeiro de 2024. Adaptado pela ARSP em julho de 2024.

Como referência, foram considerados os custos de sistemas na faixa de 4kWp por usina no âmbito nacional.

A potência média dos sistemas fotovoltaicos residenciais no Espírito Santo, em janeiro de 2024, era em torno de 7,7kWp/usina (Aneel), a potência média do comercial de 31,4kWp, a do rural de 15,3kWp e a do industrial de 37,9kWp/usina.

A potência FV residencial total no Estado, em janeiro de 2024, alcançou 233,5 MWp por meio de 30.512 usinas, que atendem a 37.561 unidades consumidoras e correspondem a 2,87% do número total de 1.309.147 consumidores.

Ressalta-se que são valores médios, portanto, devem ser utilizados somente como referência, pois foram obtidos por meio das estimativas da radiação média nas microrregiões do Estado. A análise de um local específico pode indicar a necessidade de um sistema que precise de uma infraestrutura fotovoltaica maior ou menor.

De posse das estimativas, verifica-se que há a possibilidade de grande expansão da demanda comercial para o fornecimento de materiais e serviços em microgeração fotovoltaica no Espírito Santo em todas as classes de consumidores.

NOTA

*Considerou-se um consumo médio por residência de 190 kWh/mês e que, para uma casa atendida com sistema monofásico, paga-se uma taxa mínima de 30 kWh/mês de disponibilidade. Foram utilizados dados de radiação média por microrregião.

Kits: Considerou-se compostos pelos painéis, inversores e sistemas de montagem.

Todo dimensionamento descrito neste item é orientativo, devendo um técnico fazer visita in loco para cada caso.

EVOLUÇÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA (GD) NO ESPÍRITO SANTO

A seguir, é apresentada uma comparação, por meio dos gráficos 4.2 e 4.3, sobre o desenvolvimento da Geração Distribuída (GD) no Estado entre os anos 2020 e janeiro de 2024, com as projeções da Aneel tanto para o número de usinas quanto para a potência instalada.

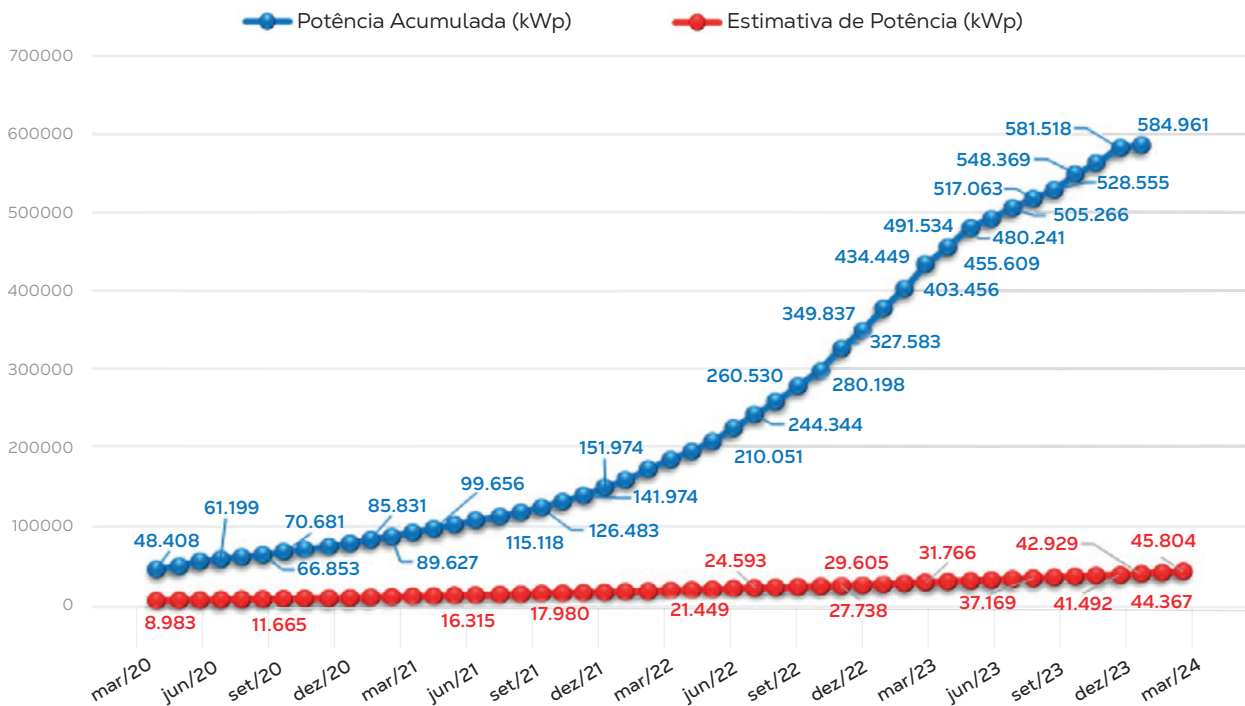
Verifica-se uma superação das projeções realizadas pela Aneel.

Das 45.832 usinas no Espírito Santo, em janeiro de 2024, 45.814 eram fotovoltaicas, 12 térmicas a biogás, quatro eólicas por cinética dos ventos e duas CGH.

A potência total alcançou 584.961,17 kWp.

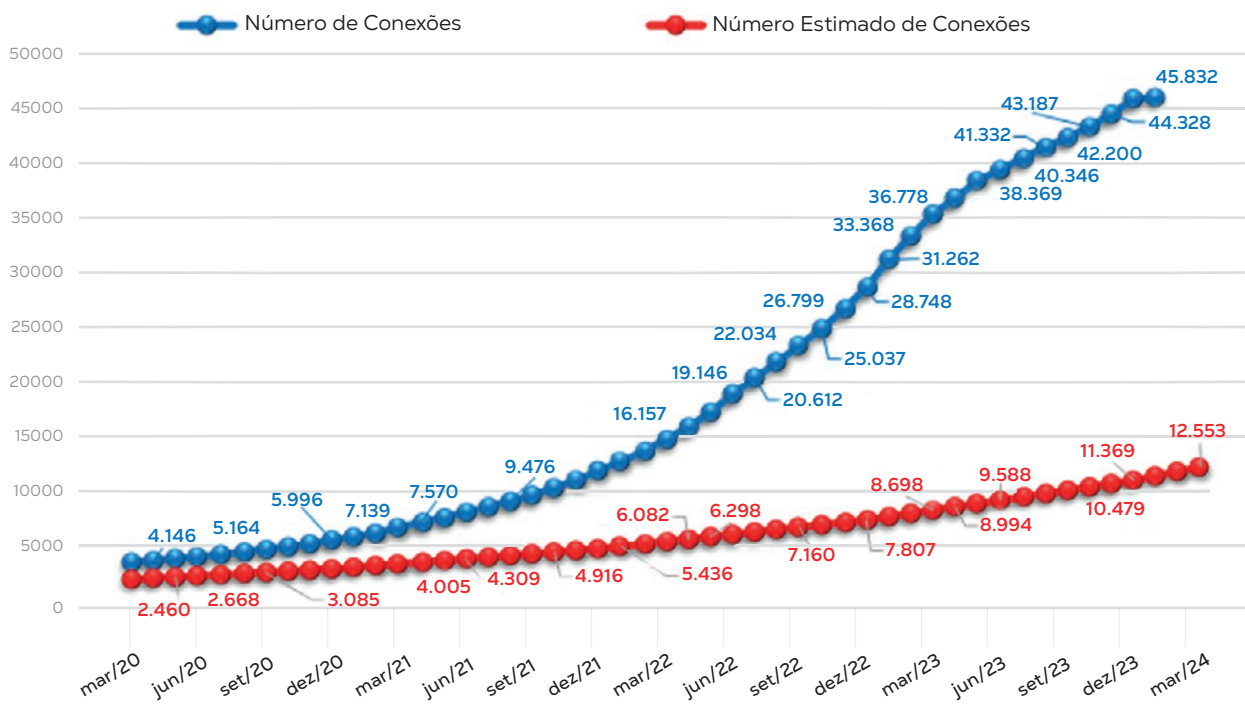
Essa potência total, dividida por categoria de usinas, corresponde respectivamente a 581.098,41 kWp, 3.735,76 kWp, 57,0 kWp e 70,0 kWp.

GRÁFICO 4.2 Evolução do número de conexões por geração distribuída no Espírito Santo



Fonte: Aneel. Elaboração ARSP. Informações energéticas de janeiro a março de 2024^[88].

GRÁFICO 4.3 Evolução da potência instalada por geração distribuída no Espírito Santo (kWp)



Fonte: Aneel. Elaboração AESP. Informações energéticas de janeiro a março de 2024^[88].

As figuras a seguir apresentam algumas fotos de sistemas FVs instalados em telhados ou coberturas de edificações no Estado.

Estas usinas podem ser instaladas também em estacionamentos, terrenos e nos diferentes tipos de espelhos d'água.



FIGURA 4.1 Fotos de residências com sistemas fotovoltaicos no Espírito Santo



Fonte: Cortesia do Grupo Pro Energia Solar do Espírito Santo.

4.2 Sistema de aquecimento residencial

Ao considerar uma residência típica com gasto médio mensal de 190 kWh/mês e tendo como base a utilização de um chuveiro de 4.400 W, comum nas residências de todo Brasil, constata-se que um sistema de aquecimento pode diminuir bastante os gastos com o uso do chuveiro.

Para isso, são adotadas as premissas:

- Suprir a necessidade de utilização do chuveiro em 80% do ano;
- Quatro banhos por dia;
- Tempo médio de banho de dez minutos;
- Supõe-se edificação nova ou existente em que haja possibilidade de instalação de sistema de aquecimento híbrido;
- Sistema de aquecimento solar híbrido, com 200 litros e cerca de 2 m² de coletor térmico, que pode utilizar recurso auxiliar (eletricidade ou gás) quando a água do reservatório não estiver aquecida satisfatoriamente.

Esse sistema é comumente utilizado em projetos de eficiência energética de concessionárias de energia.

A estimativa de economia mensal é de 60 kWh, considerando as premissas adotadas. O custo total previsto para esse sistema aquecedor, já instalado, está a partir de R\$ 2.000,00 em julho de 2024, site <https://www.cronoshare.com.br/quanto-custa/instalar-aquecedor-solar-agua-termossifao>. As fotografias desses sistemas foram apresentadas nas figuras 2.3. Pode-se ampliar os reservatórios do sistema e a área dos coletores para uso em edifícios e outras demandas de grande porte.

Os sistemas solares térmicos auxiliam na redução da demanda de energia no horário de ponta (das 18h às 21h), devido à disponibilização da água pré-aquecida para os múltiplos usos nesse horário.

4.3 Sistema composto fotovoltaico e aquecimento residencial

O sistema fotovoltaico também pode ser instalado juntamente com sistemas de aquecimento mencionados no item anterior. O objetivo principal do sistema de aquecimento é a diminuição dos gastos de energia para banho, necessitando assim de menor quantidade de energia gerada pelo sistema fotovoltaico e conseqüentemente menor infraestrutura necessária de geração, o que resulta em menores custos de projeto. Considerou-se unidades consumidoras com os 30 kWh de disponibilidade e as seguintes premissas:

→ Consumo mensal médio de 190 kWh/mês em uma residência;

→ Média de 26% de consumo de energia em uma residência para aquecimento de banho e que o sistema de aquecimento apresentado consiga suprir todas as necessidades da edificação.

Dessa forma, espera-se que um sistema de 1 kWp fotovoltaico associado ao aquecedor com as dimensões citadas atenderá à unidade consumidora com a mesma quantidade de energia em kWh/mês que o sistema FV puro de 1,4 kWp.

Do ponto de vista do custo, conforme mostra a tabela 4.2, esse conjunto fica cerca de 16,5% mais caro do que somente o fotovoltaico equivalente.

TABELA 4.2 Custo médio de um sistema composto térmico e fotovoltaico em 2024

EQUIPAMENTOS*	Custo de 1kWp FV + Aquecimento (R\$)	Custo de 1,4kWp FV (R\$)
Kit (placas, inversores e sistema de montagem)	2.020,00	2.828,00
Montagem e instalação FV	1.150,00	1.610,00
Sistema de aquecimento	2.000,00	-
TOTAL	5.170,00	4.438,00

Fonte: Greener^[87], janeiro de 2024. Adaptado pela ARSP em julho de 2024.

* Todo dimensionamento descrito neste item é orientativo, devendo um técnico fazer visita in loco para cada caso.

Os sistemas solares térmicos unidos ao FV auxiliam na redução da demanda de energia no horário de ponta (das 18h às 21h), devido à disponibilização da água preaquecida para os múltiplos usos nesse horário. A partir desses resultados, e considerando a instalação de geração fotovoltaica com aquecimento somente

em 1% das residências, chega-se aos valores equivalentes aos anteriores de demanda para estes tipos de equipamentos solar no Espírito Santo. Assim, verifica-se que há uma excelente demanda comercial para o fornecimento de materiais e serviços em microgeração fotovoltaica e aquecimento.



CAPÍTULO

5.

Potencial para
empreendimentos
de geração solar
de grande porte

5.1 Potencial nacional para empreendimentos solares de grande porte

A geração fotovoltaica de energia elétrica tem um grande potencial no Brasil e no Espírito Santo, como indica o mapa brasileiro com a energia gerada em kWh/kW/m² (Figura 5.1). Observa-se que no local menos ensolarado do Brasil, é possível gerar mais eletricidade solar do que, no local mais ensolarado da Alemanha, por exemplo, um país que é destaque no setor FV.

O mapa mostra o rendimento energético anual máximo – medido em kWh de energia elétrica gerada por ano para cada kWp de potência fotovoltaica instalada – em todo o território nacional, tanto para usinas de grande porte centralizadas e instaladas em solo como para a geração fotovoltaica distribuída integrada em telhados e coberturas de edificações e particularmente em espelhos d’água apropriados.

A taxa de desempenho médio anual de 80% foi adotada para simplificar a análise e representa o desempenho de um gerador solar fotovoltaico bem projetado e instalado com equipamentos de boa qualidade e etiquetados pelo Inmetro. A concentração populacional é também mostrada por meio dos círculos azuis distribuídos pelo território brasileiro no mapa 5.1.

As usinas de grande porte são tipicamente instaladas em solo sobre estruturas metálicas inclinadas fixas, ou com seguimento da trajetória aparente do Sol em um eixo, e têm sido localizadas principalmente nas regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste do Brasil. Essas regiões apresentam os maiores rendimentos médios anuais, como mostra o mapa 5.1.

Como se pode ver no capítulo 1.5.2.1, em julho de 2024 havia uma potência instaladas fotovoltaica outorgada de 14,3 GWP no País.

Os Estados com maiores capacidades instaladas FV por outorga estão na região Nordeste e no Sudeste do País, sendo Minas Gerais e Piauí os com maiores potências instaladas. O Brasil contava com 138 usinas FV em construção com potência de 6,0 GWP e 2.773 com a construção não iniciada cuja potência é de 112,4 GWP.

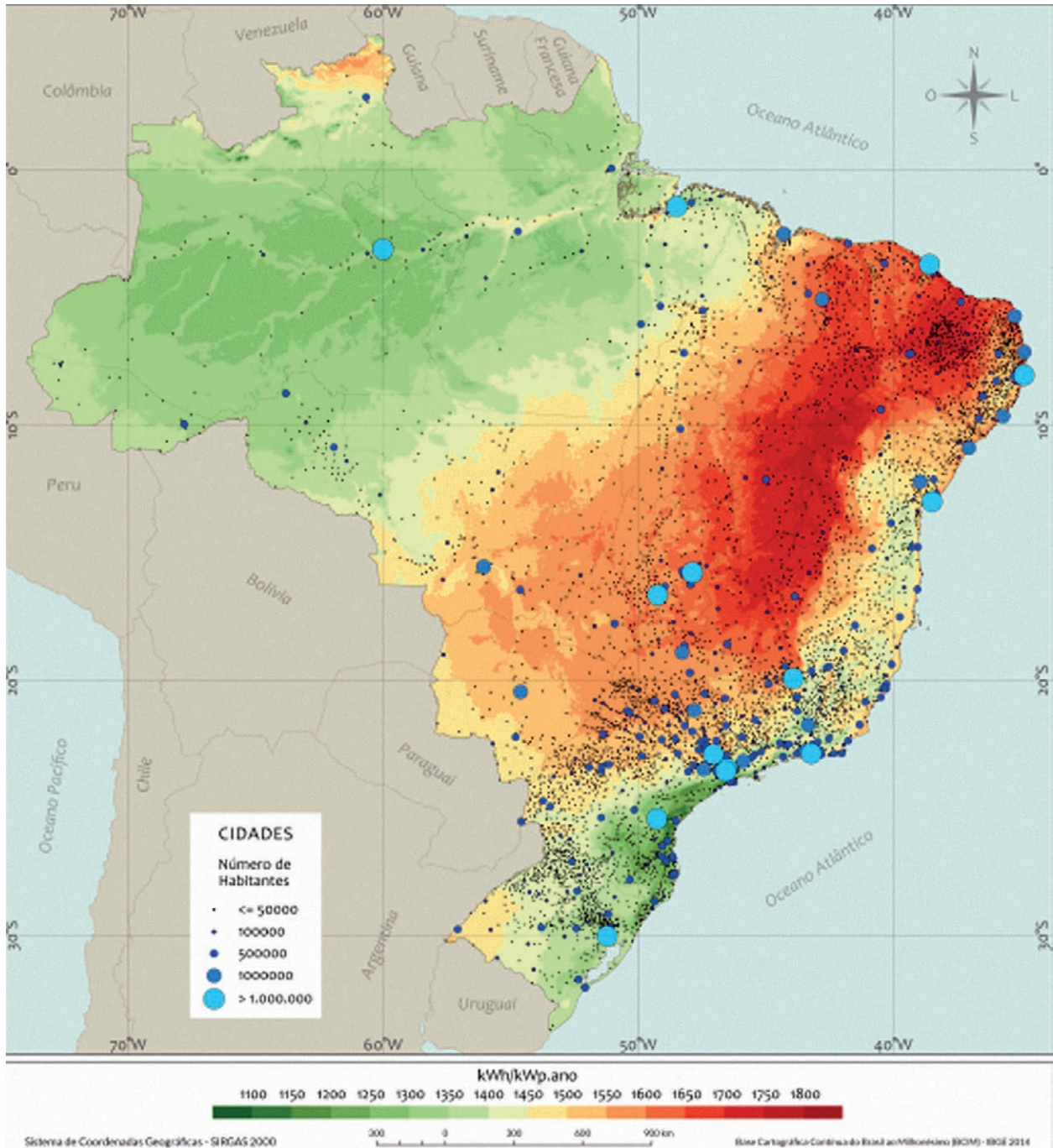
À medida que os consumidores migrarem do Ambiente de Contratação Regulada (ACR) para o Ambiente de Contratação Livre (ACL), ou mercado livre, mais usinas solares centralizadas serão demandadas em todo o Brasil e no Espírito Santo, trazendo oportunidades para grandes empreendimentos solares e híbridos com as demais fontes renováveis no Estado.

Os empreendimentos de geração solar podem utilizar a tecnologia fotovoltaica, a solar térmica ou a heliotérmica, sendo que, para as duas últimas, alguns critérios devem ser obedecidos além da alta incidência de radiação solar. A seguir, estão alguns dos principais fatores que influenciam na escolha da região ^[9]:

- Proximidade de linhas de transmissão, distribuição e subestações;
- Disponibilidade de terreno (áreas não envolvidas em disputas judiciais);
- Declividade (menor declividade diminui o sombreamento e custo para nivelamento do terreno);
- Ocupação (ocupação do solo);
- Risco (enchentes, incêndio etc);
- Disponibilidade de água (água para limpeza dos painéis ou refrigeração);
- Logística (acesso à área do empreendimento).

Adicionalmente, é necessário ratificar os valores de radiação estimada indicados pelos mapas, visto que eles apresentam estimativas da distribuição da radiação sobre macrorregiões do Estado, e uma vez que a radiação solar é a variável de maior peso na economicidade do futuro empreendimento. Essa medida visa reduzir a incerteza na geração de energia pela usina. Como ação mitigadora, o investidor deverá considerar um período mínimo de medições da radiação solar no local da usina e em um raio no seu entorno para verificar os desvios com os valores estimados.

MAPA 5.1 Potencial de geração solar fotovoltaica em termos do rendimento energético anual para todo o Brasil (kWh/kWp.ano)



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2017.

5.2 Macrorregiões com aptidão para geração fotovoltaica de maior porte no Espírito Santo

O Brasil e o Estado do Espírito Santo têm níveis excelentes de radiação, principalmente se comparado a países europeus como Alemanha, França e Espanha, alguns dos locais no mundo cujo avanço da energia FV mais se destaca.

Vale reforçar que, no tópico 1.6, o Mapa 1.3 da irradiação diária no plano inclinado, média anual, apresenta os níveis de radiação estadual com valor médio próximo a 5,2 kWh/m²/dia por município, referência levantada pela EPE de irradiação diária para empreendimentos de grande porte do tipo heliotérmico. Eles são equivalentes à média de locais no País onde houve pedidos de outorga de usinas FV de grande porte, maiores que 10MW, 30MW etc.

Observa-se também, nesse mapa, as características da infraestrutura elétrica no Espírito Santo, mostrando a aptidão do Estado para receber empreendimentos de geração solar de grande porte.

Essas informações confirmam que o potencial natural solar do Estado para a geração de energia e a infraestrutura de conexão, escoamento e alto consumo próximos o tornam uma Unidade Federativa (UF) com vocação para os empreendimentos solares de grande porte em todas as suas macrorregiões, além da geração distribuída.

Pode, assim, atender grandes clientes consumidores de energia, de maneira que se consegue explorar, junto das coberturas das edificações, os terrenos e até mesmo os espelhos d'água disponíveis diversos.

5.3 Macrorregiões com aptidão para geração heliotérmica de maior porte no Espírito Santo

O Mapa 1.3 citado, de irradiação no plano inclinado, traz um indicativo das macrorregiões com radiação solar (média anual do total diário), todas com radiação em torno de 5,2 kWh/m²/dia. Este critério é referente ao valor mínimo requerido para viabilização técnica do projeto.

Essas estimativas, de valor mínimo de radiação requerida, foram levantadas junto a fornecedores de equipamentos e consultores durante visita de técnicos da EPE a instalações de Centrais de Geração por concentração solar na Espanha e Alemanha em abril de 2012^[16]. Atualmente, esse mínimo é menor, dada à melhoria na

eficiência de absorção e conversão da irradiação em energia útil, propiciando considerar a maior parte do território do Espírito Santo viável para estas centrais heliotérmicas.

Ou seja, grande parte do território do Estado tem aptidão natural, com radiação adequada, para os empreendimentos heliotérmicos de maior porte, com o acompanhamento de infraestrutura elétrica. Isso torna o Espírito Santo uma unidades federativas com predisposição para os empreendimentos solares heliotérmicos de médio a grandes portes na maior parte do seu território e vocação em suas macrorregiões de maior irradiação.



CAPÍTULO

6.

Climatologia do
Espírito Santo

6.1 Introdução a Climatologia do Espírito Santo

O Espírito Santo situa-se na faixa leste do Sudeste brasileiro, com uma área aproximada de 46.078 km², onde o regime pluviométrico é tipicamente sazonal, apresentando dois períodos distintos: um com grande volume de chuva e outro com decréscimo acentuado de pluviosidade. Contudo, isso não significa que a variabilidade interanual se comporte num único padrão nas escalas de tempo e espaço.

Segundo Nunes, Vicente e Candido (2009)^[41] e Alves *et al.* (2005)^[30], o início do período chuvoso na região Sudeste do Brasil está ligado ao padrão de circulação e termodinâmica regional e à atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Esses fatores se consolidam durante a primavera, favorecendo a ocorrência de chuvas convectivas frequentemente volumosas. Durante a estação seca, fenômenos de grande escala, como massas de ar frio e seco, resultam na diminuição da precipitação, especialmente do litoral para o interior.

Apesar de sua pequena extensão territorial, o Espírito Santo possui uma grande diversidade climática, que pode variar de clima quente e seco a frio e chuvoso. A variabilidade das chuvas no Estado está condicionada, em parte, às suas características geográficas. Isso se dá pelo fato de possuir áreas montanhosas, principalmente em sua parte central e sul, contrastando com regiões planas ao longo do litoral e no Norte do Estado^[47].

De acordo com Kousky (1988), a ZCAS é caracterizada como uma banda de nebulosidade alongada, orientada no sentido noroeste-sudeste, estendendo-se desde a região amazônica até o Oceano Atlântico, apresentando duração superior a quatro dias. Já o Alta Subtropical do Atlântico Sul (Asas) é um centro de altas pressões geradas pela circulação geral da atmosfera, que garante climatologicamente condições de estabilidade, com pouca nebulosidade, ventos de quadrantes norte e leste e temperaturas amenas. Segundo Satyamurty *et al.* (1998), nas regiões sob a influência desse sistema, a forte subsidência e a divergência dos ventos à superfície inibem os movimentos verticais, dificultando

a formação de nuvens e conseqüentemente a ocorrência de chuvas. Como todo o litoral é banhado pelo Oceano Atlântico, há influência direta dos ventos sinóticos provenientes do Asas e do sistema de brisa terrestre/marítima.

De acordo com Nunes, Vicente e Candido (2009)^[41], Minuzzi *et al.* (2007) e Alves *et al.* (2005)^[30], o início do período chuvoso na região Sudeste do Brasil está ligado ao padrão de circulação, à termodinâmica regional e à atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que vão se consolidando no decorrer da primavera e ao longo do verão, contribuindo para a ocorrência de chuvas convectivas, muitas vezes volumosas.

Na estação menos chuvosa (inverno), a influência dos fenômenos de grande escala, como o adentramento do Asas em direção ao continente, e a influência das altas polares migratórias promovem a redução da nebulosidade e, conseqüentemente, acarretam uma diminuição dos valores de precipitação no sentido do litoral para o interior da região Sudeste. Entretanto, nesta estação, ocorrem maiores volumes de chuva no litoral em virtude do transporte de umidade do oceano em direção ao continente devido à circulação marítima.

De acordo com o Atlas Climatológico do Espírito Santo – 2024, do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper), as normais climatológicas representam os valores médios das variáveis meteorológicas em uma determinada região ao longo de um período mínimo de 30 anos, conforme recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM).

Essas normais são calculadas para períodos mensais, sazonais e anuais com base nos dados diários coletados. Para o mês de fevereiro, uma exceção, utilizam-se 28 dias para anos normais e 29 dias para anos bissextos. A distribuição sazonal considera o verão nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro; o outono nos meses de março, abril e maio; o inverno nos meses de junho, julho e agosto; e a primavera nos meses de setembro, outubro e novembro.

Para o cálculo de precipitação pluviométrica, os valores de altura de precipitação acumulada foram computados diariamente ao longo do período de 1978 a 2019, resultando na determinação da altura média (mm) de precipitação acumulada por mês, estação e ano. Durante este processo, uma avaliação criteriosa da distribuição espacial dos pontos foi conduzida para evitar sobreposições, e os *outliers*, definidos como dados que se distanciam significativamente da média da amostra analisada, foram removidos da série histórica. A metodologia para temperatura do ar foi calculada por três métodos, seguindo critérios adotados pelo Inmet (2022), descritos no Atlas Climatológico do Espírito Santo, do Incaper (2024), disponível em https://meteorologia.incaper.es.gov.br/atlas_clima_es.

Os mapas mensais, sazonais e anuais de precipitação foram caracterizados em intervalos de classes com o objetivo de identificar distintas áreas de acumulação de precipitação. A interpolação da variável precipitação foi realizada por meio de krigagem ordinária.

Para interpolar a temperatura e a evapotranspiração, utilizou-se a regressão linear múltipla. Os modelos de regressão linear múltipla empregaram o modelo digital de terreno SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), com resolução de 90 metros. As bases de dados gerados e utilizados no Atlas Climatológico do Espírito Santo estão disponíveis em <https://ide.geobases.es.gov.br/maps/1325>.

De maneira geral, o período com volume de precipitação mais baixo (período seco) vai de maio a setembro, e o de maior volume, de outubro a abril (período chuvoso), (Mapas 6.1 e 6.2) ^[39] ^[40] ^[47].

Durante o período seco, as precipitações na porção oeste, que faz divisa com o Estado de Minas Gerais, têm acumulados de chuva entre 100-200mm. Já no litoral capixaba e Região Serrana, os acumulados de chuva ficam entre 300-400mm, com um destaque para a região entre Alfredo Chaves e Vargem Alta. Esses municípios, ao longo do período seco, devido à elevação do relevo que tem como característica paisagem acidentada e montanhosa, associada à proximidade com o mar, favorece a advecção de vapor d'água (transporte de umidade relativa na horizontal), e tem papel crucial na formação

de chuvas orográficas. Neles os acumulados de precipitação ficam entre 400-500mm.

O período chuvoso no Espírito Santo ocorre predominantemente entre os meses de outubro e abril. Durante esses meses, a região experimenta um aumento significativo na precipitação, influenciado por diversos fatores climáticos que caracterizam o clima tropical da área.

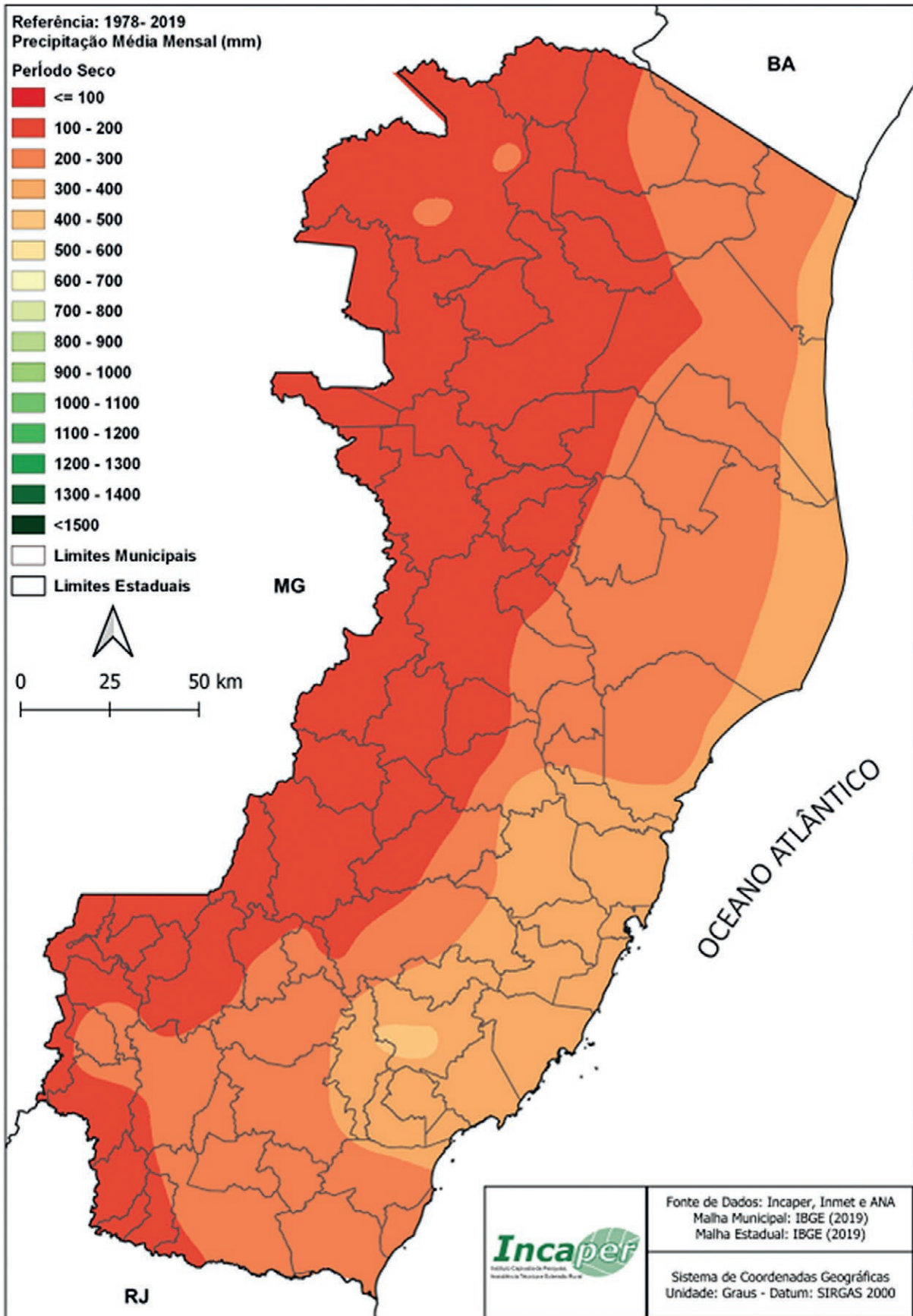
No início do período chuvoso, em outubro, as primeiras chuvas começam a surgir marcando a transição da estação seca para a úmida. As chuvas tendem a se intensificar progressivamente, alcançando seu pico entre os meses de novembro e dezembro, com uma típica redução das chuvas e calor intenso (veranico). Esse período de alta precipitação é crucial para a recarga dos mananciais, a manutenção da umidade do solo e o suporte às atividades agrícolas, que dependem diretamente das chuvas para o cultivo de diversas culturas.

A distribuição das chuvas durante esses meses não é uniforme. A topografia e o relevo acidentado do Espírito Santo, com suas regiões montanhosas e vales, contribuem para a variabilidade espacial das precipitações. As áreas localizadas nas encostas das serras geralmente recebem mais chuva devido ao efeito orográfico – a advecção de vapor d'água, transportada por ventos marítimos que sopra de leste para o oeste e se chocam com a barreira de montanhas –, favorecendo a subida forçada e condensação do vapor d'água. Conseqüentemente, as massas de ar úmido são forçadas a subir, resfriando e condensando, o que resulta em precipitações mais intensas.

Os sistemas meteorológicos que influenciam o regime de chuvas no Espírito Santo durante esse período incluem a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), frentes frias e a atuação de ventos alísios que trazem umidade do Oceano Atlântico. A interação desses sistemas pode causar eventos de chuvas contínuas e, em alguns casos, temporais intensos acompanhados de trovoadas e rajadas de vento.

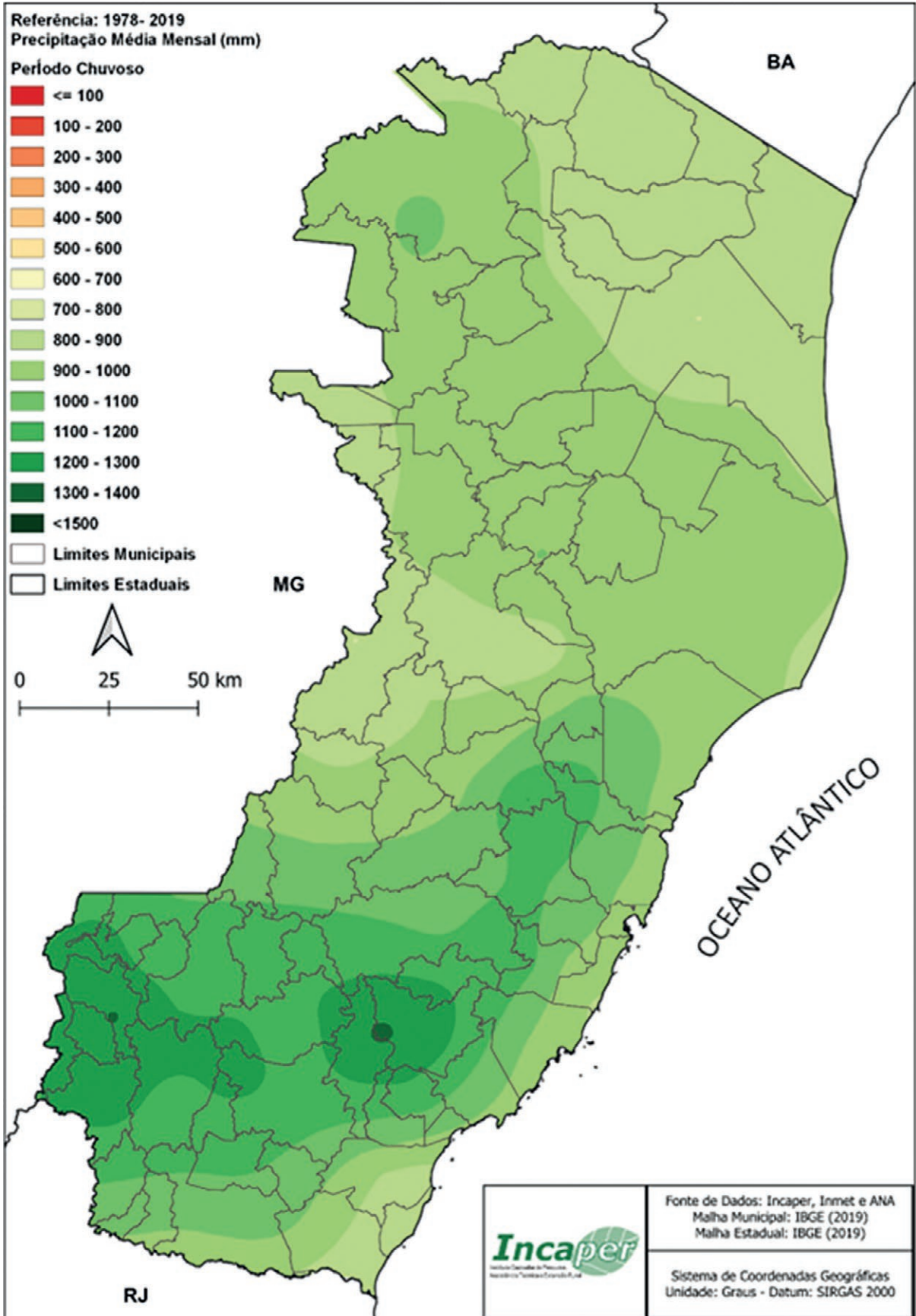
O período chuvoso apresenta acumulados de precipitação que variam entre 800-900mm nas áreas mais baixas, e na região montanhosa (Sul-Caparaó e Serrana Capixaba), ficam entre 1300-1500 mm.

MAPA 6.1 Precipitação média anual (1978-2019), período seco no Espírito Santo (mm)

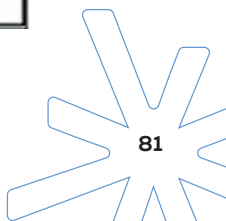


Fonte: Coordenação de Meteorologia do Incaper – Atlas Climatológico do Espírito Santo, 2024.

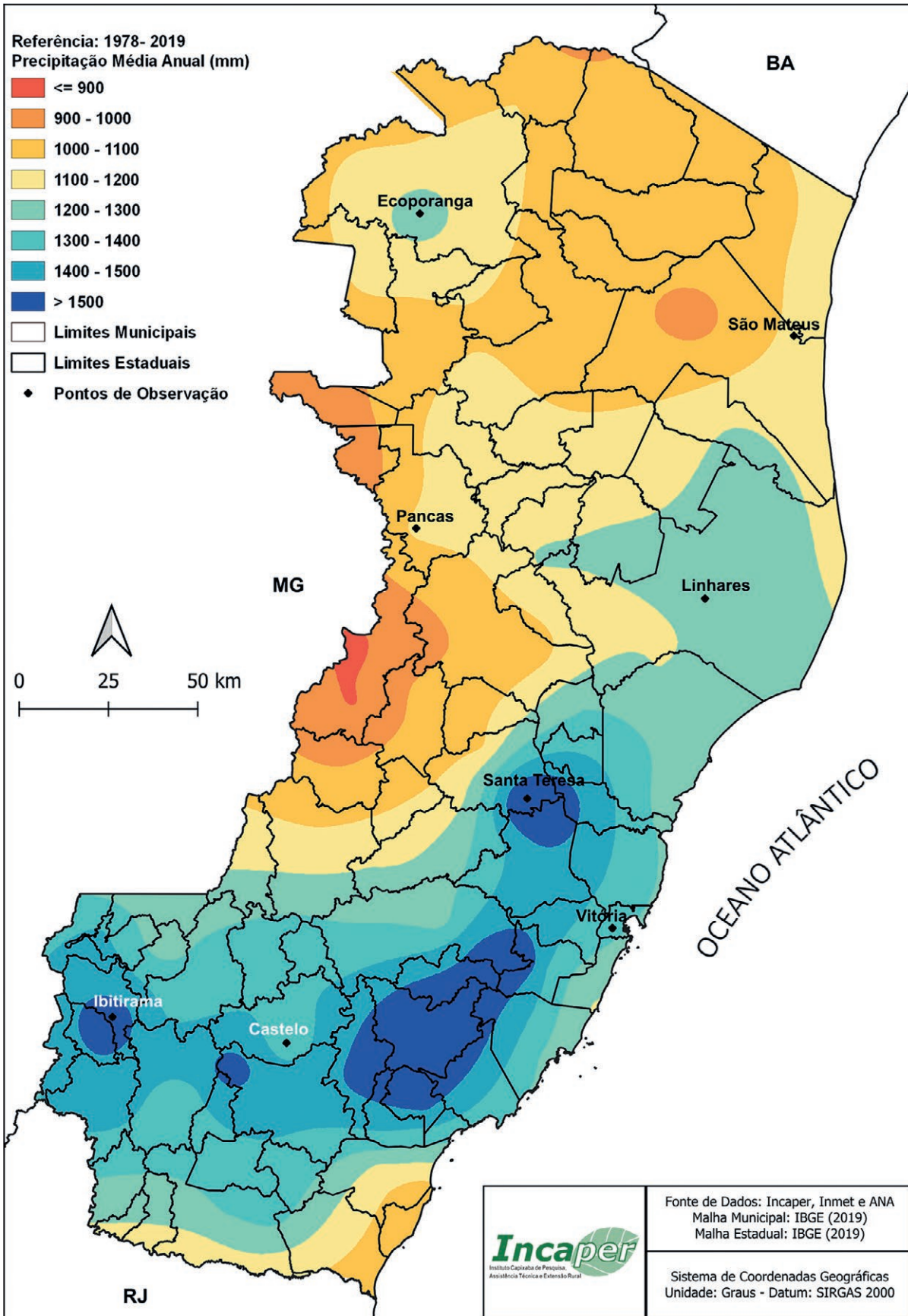
MAPA 6.2 Precipitação média anual (1978-2019), período chuvoso no Espírito Santo (mm)



Fonte: Coordenação de Meteorologia do Incaper – Atlas Climatológico do Espírito Santo, 2024.



MAPA 6.3 Precipitação média anual (1978-2019) no Espírito Santo (mm)



Fonte: Coordenação de Meteorologia do Incaper – Atlas Climatológico do Espírito Santo, 2024.

A precipitação anual do Espírito Santo tem os maiores acumulados de chuva em áreas com altitudes mais elevadas. Na região Serrana e Caparaó, ficam entre 1400-1.500 mm por ano, com destaque para a região mais alta, entre os municípios de Alfredo Chaves, Atilio Vivácqua, Ibitirama, Marechal Floriano, Domingos Martins e Santa

Teresa, onde a precipitação anual, segundo esta climatologia, ultrapassa os 1.500mm/ano (mapa 6.3). Em áreas com altitudes mais baixas e no litoral (900-1.300 mm/ano), a precipitação é pluviométrica inferior a 900 mm na região Noroeste, envolvendo o município de Baixo Guandu e Aimorés, na divisa com Minas Gerais (mapa 6.3).

6.2 Precipitação no Espírito Santo

DURANTE O VERÃO

O verão na Região Sudeste do Brasil, especialmente no Espírito Santo, é uma estação que se destaca por condições climáticas intensas e influências meteorológicas complexas. Esse período, compreendido entre dezembro e fevereiro, é caracterizado por altas temperaturas, chuvas abundantes e dias mais longos, condições que moldam tanto o ambiente natural quanto as atividades humanas na região.

Uma das características mais marcantes do verão capixaba é a presença da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), um sistema meteorológico crucial que contribui significativamente para o regime de chuvas no Estado. A ZCAS é formada pela interação entre a Alta Subtropical do Atlântico Sul e o cavado de médios níveis, resultando em uma faixa de nebulosidade e precipitação que se estende do Oceano Atlântico até o interior do continente. Durante o verão, a atuação persistente da ZCAS no Espírito Santo traz precipitações intensas e prolongadas, com impacto direto sobre o clima da região.

Essas chuvas são frequentemente reforçadas pela instabilidade termodinâmica típica dessa estação. As altas temperaturas e a elevada umidade do ar criam condições ideais para a formação de nuvens convectivas. Esse tipo de nuvem, ao se desenvolver rapidamente, pode provocar chuvas fortes acompanhadas de trovoadas e ventos intensos, sobretudo durante as tardes e noites. Esse comportamento meteorológico é típico do verão na Região Sudeste e intensificado pela geografia do Espírito Santo, onde a variação da altitude e a proximidade com o mar modulam o padrão das precipitações.

A precipitação média acumulada durante o verão no Espírito Santo, segundo a climatologia

proposta (1979-2019), geralmente excede os 400 mm, com registros superiores a 500 mm na região do Caparaó, e na região Serrana capixaba, onde a orografia local intensifica as chuvas. Nas regiões litorâneas (Norte, Sul e Grande Vitória), os acumulados variam entre 300 e 400 mm, refletindo a influência marítima, que, por meio da brisa, transporta umidade do mar em direção à porção continental (Mapa 6.4).

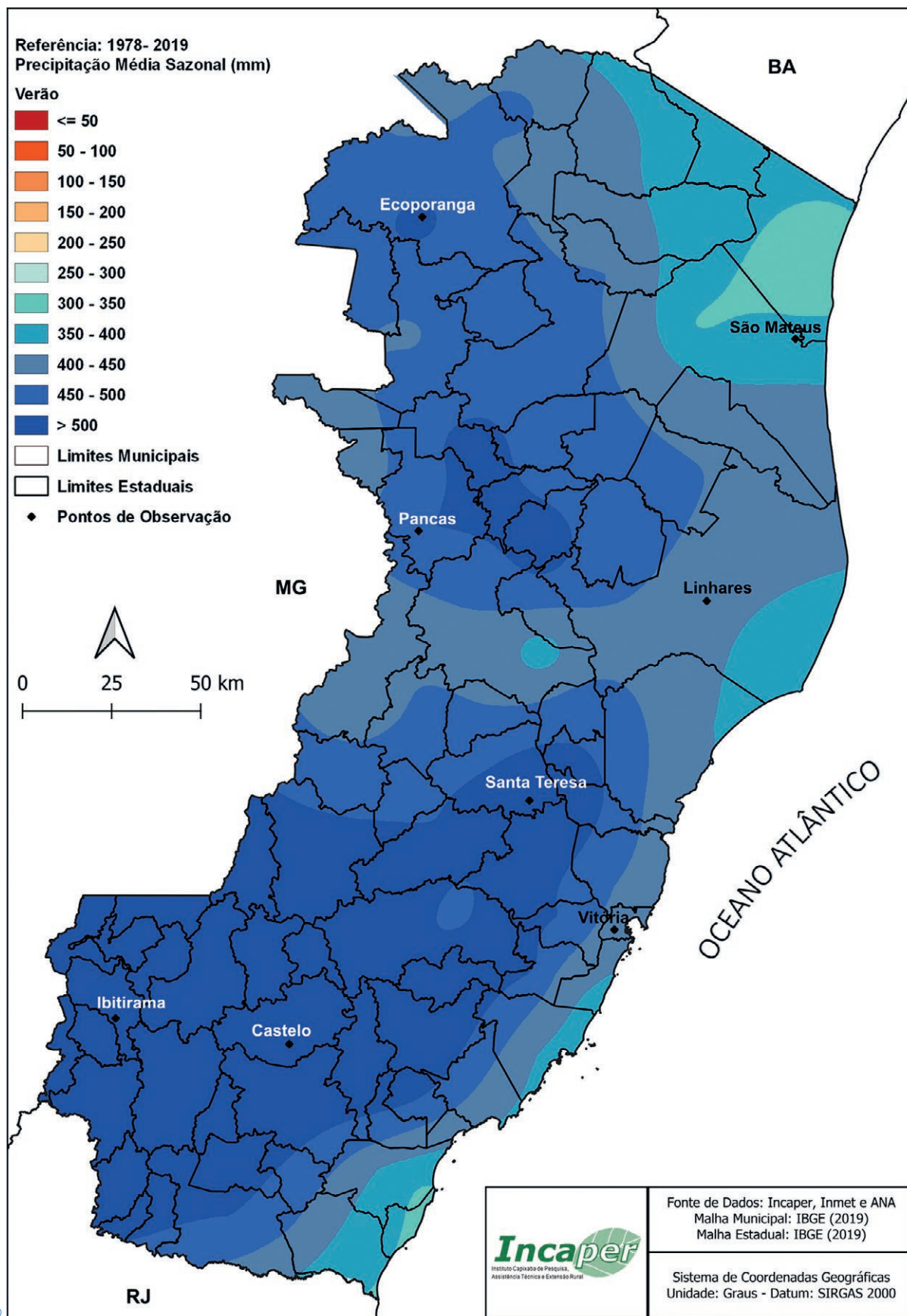
Além dos aspectos meteorológicos, o verão exerce uma influência direta sobre a economia e a sociedade do Espírito Santo. A agricultura, por exemplo, depende das chuvas para o cultivo de culturas tropicais, como o café e a cana-de-açúcar. No entanto, a intensidade das precipitações também pode trazer desafios, como alagamentos e deslizamentos de terra, especialmente em áreas com maior vulnerabilidade geológica. Esses eventos extremos exigem planejamento e gestão de riscos por parte das autoridades locais para minimizar os impactos sobre a população e as infraestruturas.

Por outro lado, as praias do litoral capixaba, beneficiadas pelas altas temperaturas e pelo sol intenso, atraem turistas de diversas partes do País, estimulando a economia local. Assim, o verão no Espírito Santo não é apenas uma estação de transformações naturais, mas também um período de grande importância para o desenvolvimento econômico e social da região.

DURANTE O OUTONO

O outono no Espírito Santo é marcado como uma estação de transição que incorpora elementos típicos tanto do verão quanto do inverno. Essa característica dual se reflete em mudanças atmosféricas rápidas e significativas, destacando a complexidade e a dinamicidade desse período. No Espírito Santo, essas alterações climáticas

MAPA 6.4 Precipitação média durante o verão (1978-2019) no Espírito Santo (mm)



Fonte: Coordenação de Meteorologia do Incaper – Atlas Climatológico do Espírito Santo, 2024.

são particularmente perceptíveis com o início da estação, trazendo um padrão de chuvas que gradualmente dá lugar a condições mais secas à medida que o inverno se aproxima.

No início do outono capixaba, as chuvas ainda são relativamente frequentes, resultado da atuação de sistemas de baixa pressão e frentes frias, que, embora menos intensos do que no verão, continuam a promover a formação de nuvens e precipitações. Contudo, conforme a estação avança, nota-se uma diminuição significativa das chuvas, em parte devido ao aumento da frequência de massas de ar frio que vêm do sul do continente. Essas massas, muitas vezes associadas a sistemas frontais, trazem ar mais seco e, em alguns casos, causam uma queda acentuada nas temperaturas, marcando a transição gradual para o inverno.

Em termos de precipitação média, o outono no Espírito Santo, segundo a climatologia proposta (1979-2019), apresenta uma variabilidade espacial notável. Na região Nordeste do Estado, os acumulados de chuva durante a estação variam entre 250 e 300 mm. No extremo Norte e no setor Noroeste, essas quantidades são ligeiramente menores, ficando entre 150 e 250 mm. Em outras áreas, como a Região Serrana e o Litoral, os valores médios de precipitação aumentam, variando entre 300 e 350 mm, com acumulados máximos que podem chegar a 450 mm em localidades próximas a Alfredo Chaves e Vargem Alta. Esse padrão de distribuição de chuvas é fortemente influenciado pela topografia e pela posição geográfica, que modulam tanto a intensidade quanto a frequência das precipitações ao longo da estação (Mapa 6.5).

Além da variabilidade na precipitação, o outono também traz mudanças significativas nas temperaturas. Com o avanço do outono, as inversões de ar frio se tornam mais frequentes e intensas, contribuindo para uma queda gradual nas temperaturas médias, especialmente durante a noite, quando o resfriamento radiativo se acentua.

Essas características climáticas do outono são essenciais para diversas atividades econômicas e sociais no Espírito Santo. A agricultura, por exemplo, beneficia-se da redução das chuvas e das temperaturas mais amenas, condições ideais para o desenvolvimento de culturas específicas, como o café, uma das principais *commodities* do Estado. O turismo, particularmente nas áreas serranas,

também experimenta um aumento na demanda, impulsionado por condições climáticas favoráveis ao ecoturismo e a outras atividades ao ar livre.

Compreender esse complexo cenário climático exige uma análise detalhada das variáveis meteorológicas e da interação destas com fatores geográficos locais. É fundamental recorrer a fontes confiáveis de dados climáticos e meteorológicos, como estudos regionais e registros históricos, para obter uma visão abrangente das tendências e padrões que caracterizam o outono no Espírito Santo. Dessa forma, é possível entender não apenas as condições predominantes, mas também os fenômenos extremos que podem ocorrer, como ondas de frio tardias ou chuvas intensas fora de época, que podem ter impactos relevantes na vida cotidiana e nas atividades econômicas da região.

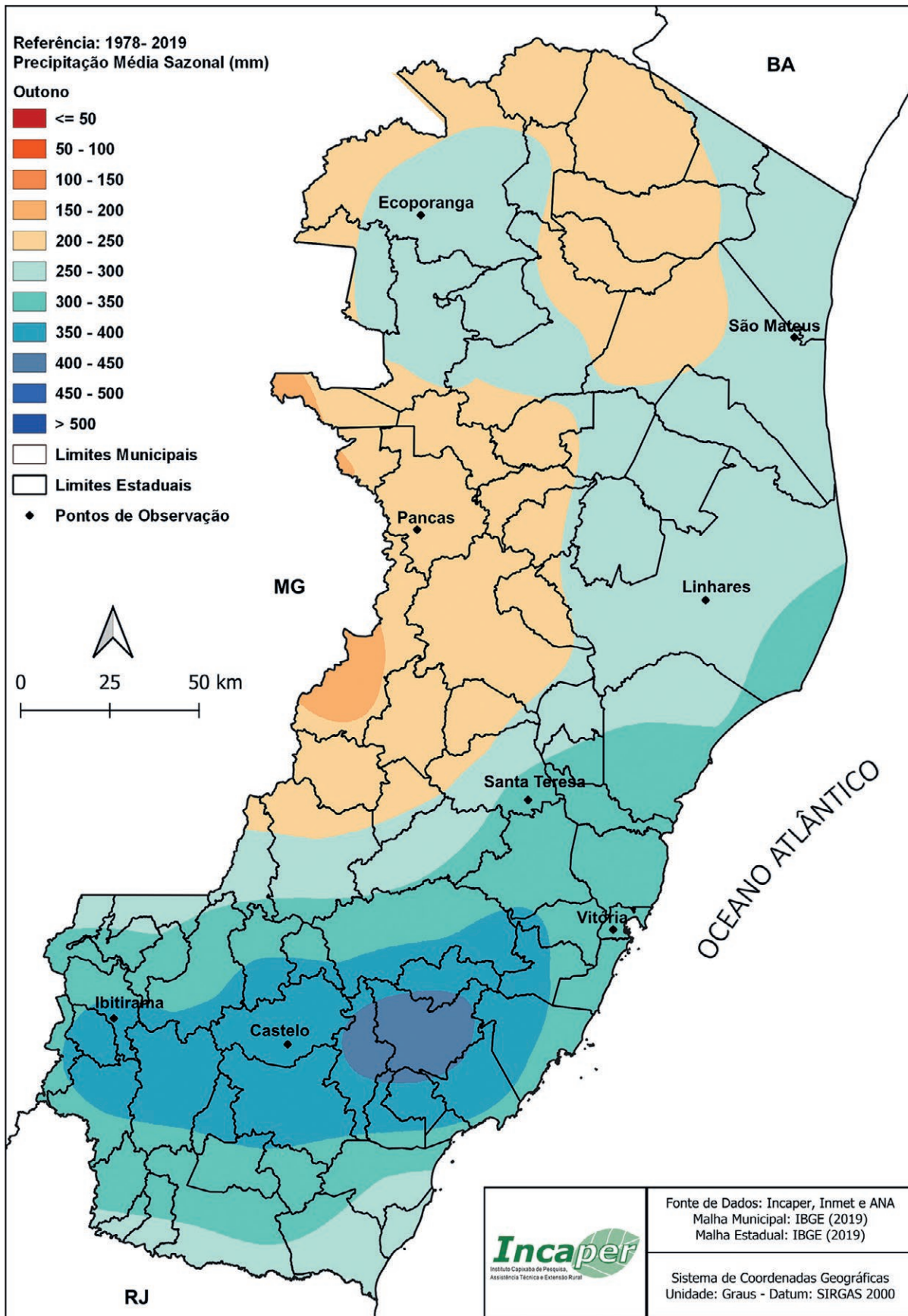
DURANTE O INVERNO

O inverno no Espírito Santo é caracterizado por temperaturas amenas e uma notável redução nas precipitações. Durante essa estação, os dias se tornam mais curtos, enquanto as noites se prolongam, criando um ambiente propício para a queda acentuada das temperaturas, especialmente nas regiões Serrana e áreas distantes do Litoral. Esse período do ano é o mais seco e frio no Estado, com o clima fortemente influenciado pela passagem de frentes frias, que trazem consigo massas de ar polares intensas.

As frentes frias desempenham um papel central na determinação das condições climáticas do inverno capixaba. Ao avançarem pelo Estado, essas frentes são acompanhadas por massas de ar frio e seco que reduzem significativamente as temperaturas e inibem a formação de nuvens, resultando em baixos índices de precipitação. É notável a queda no acumulado de chuva ao longo da estação em todo o Espírito Santo. No Oeste capixaba, por exemplo, o acumulado pluviométrico durante o inverno é frequentemente inferior a 100 mm, enquanto no Leste, sob a influência marítima, esses valores podem variar entre 150 e 200 mm. Esse padrão seco é um contraste notável com as estações mais chuvosas do ano (Mapa 6.6).

Além da diminuição das chuvas e das temperaturas, o inverno no Espírito Santo é caracterizado por fenômenos meteorológicos específicos, como as inversões térmicas e a formação de

MAPA 6.5 Precipitação média durante o outono (1978–2019) no Espírito Santo (mm)



Fonte: Coordenação de Meteorologia do Incaper – Atlas Climatológico do Espírito Santo, 2024.

nevoeiros. As inversões térmicas ocorrem quando uma camada de ar mais quente se posiciona sobre uma camada de ar mais frio próxima à superfície, criando uma barreira que dificulta a dispersão de poluentes e pode intensificar a sensação de frio. Esse fenômeno é mais comum durante as noites e nas primeiras horas da manhã, quando o resfriamento da superfície é mais intenso devido à perda de calor por radiação. A alta umidade relativa do ar durante essas horas favorece a formação de nevoeiros densos, especialmente em áreas de vales e baixadas, onde o ar frio tende a se acumular.

Apesar das noites frias e úmidas, as tardes de inverno no Espírito Santo podem ser relativamente amenas, especialmente em dias de céu claro, quando a radiação solar aquece rapidamente a superfície. Nessas ocasiões, a umidade relativa do ar tende a cair drasticamente, particularmente em regiões afastadas do Litoral. Em alguns casos, os índices de umidade podem atingir níveis críticos, abaixo de 20%, o que pode afetar a saúde humana, causando desconforto respiratório e aumentando a vulnerabilidade a doenças. Além disso, a baixa umidade relativa eleva o risco de incêndios florestais e queimadas, especialmente em áreas de vegetação seca, que se tornam mais suscetíveis ao fogo sob essas condições.

Para entender o inverno no Espírito Santo de forma abrangente, é necessário analisar as condições meteorológicas que moldam essa estação, considerando fatores locais e padrões climáticos regionais e globais. As frentes frias e as massas de ar polares são componentes essenciais desse cenário, mas as variações de temperatura, umidade relativa e fenômenos como inversões térmicas também são cruciais na definição do clima invernal no Estado. Estudos climatológicos, dados meteorológicos históricos e modelagens atmosféricas são fundamentais para uma compreensão mais aprofundada dessas dinâmicas, permitindo o desenvolvimento de estratégias de adaptação e mitigação dos impactos que o inverno pode causar na população e no meio ambiente do Espírito Santo.

DURANTE A PRIMAVERA

A primavera na Região Sudeste do Brasil é uma estação de transição que conecta o inverno seco ao verão chuvoso. No Estado do Espírito Santo, essa transição é evidente, com o clima se afastando

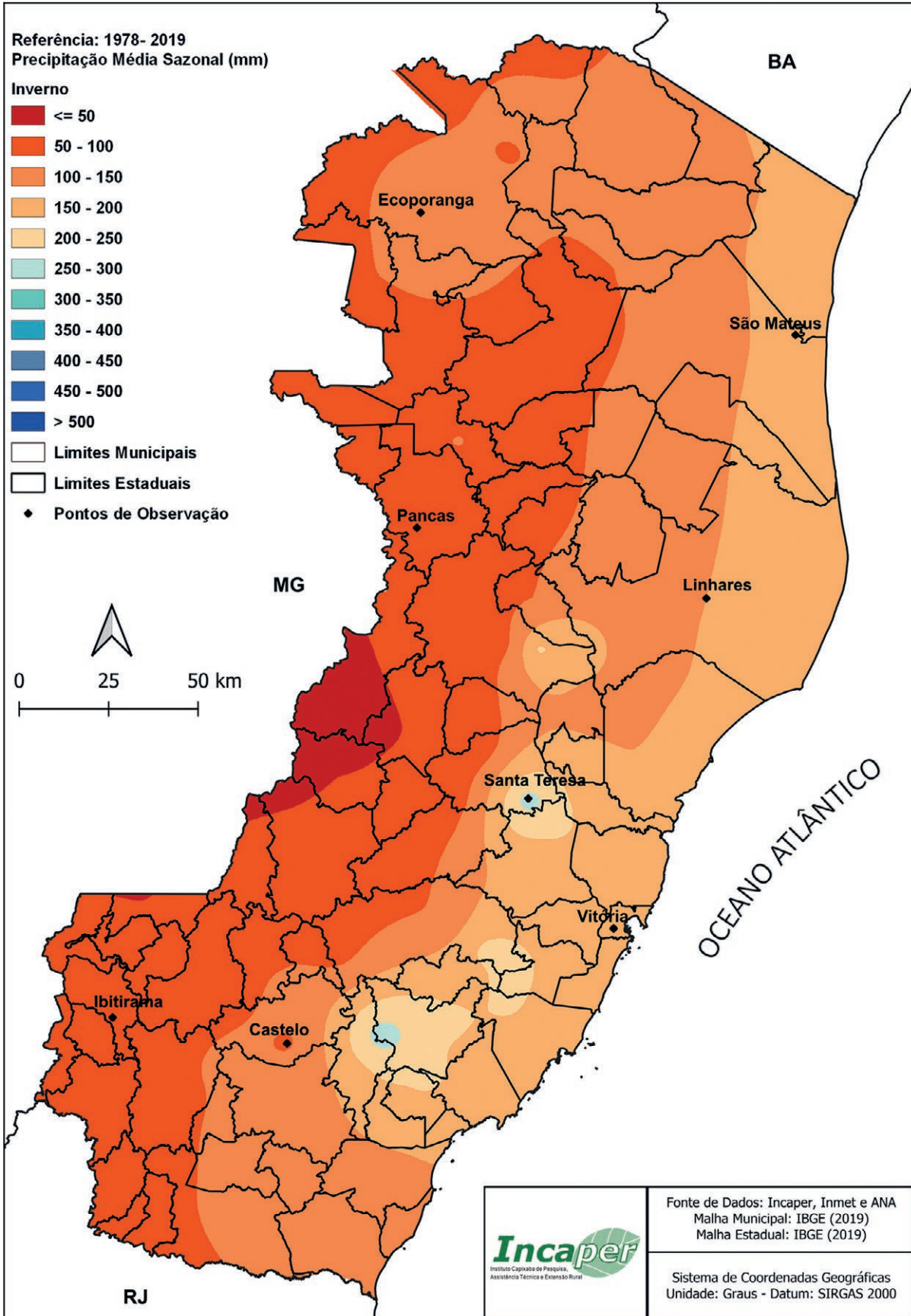
gradualmente das características frias e secas do inverno em direção à umidade e ao calor que marcam o verão. Durante a primavera, o clima é moldado por uma combinação de sistemas atmosféricos que, embora não tão intensos quanto os do verão, desempenham um papel crucial na definição das condições meteorológicas da estação.

No início da primavera, as frentes frias ainda influenciam o Espírito Santo, especialmente na Região Serrana. Essas frentes, acompanhadas por massas de ar frio, podem causar quedas temporárias de temperatura, criando um contraste entre o resfriamento noturno e o aquecimento diurno. Esse padrão favorece a instabilidade atmosférica, que resulta nas primeiras pancadas de chuva da estação. Tais chuvas são comuns à tarde e à noite, particularmente nas regiões Sul e Serrana, onde a topografia acidentada intensifica a elevação do ar quente e úmido, levando à formação de nuvens carregadas e precipitações convectivas.

À medida que a primavera avança, a frequência e a intensidade das chuvas aumentam progressivamente. Esse aumento nas precipitações marca a transição da estação seca para a chuvosa e está associado ao retorno das zonas de convergência de umidade, como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Embora a ZCAS seja mais comum no verão, ela pode se formar durante a primavera, trazendo chuvas prolongadas e intensas, especialmente nas áreas litorâneas e serranas do Espírito Santo.

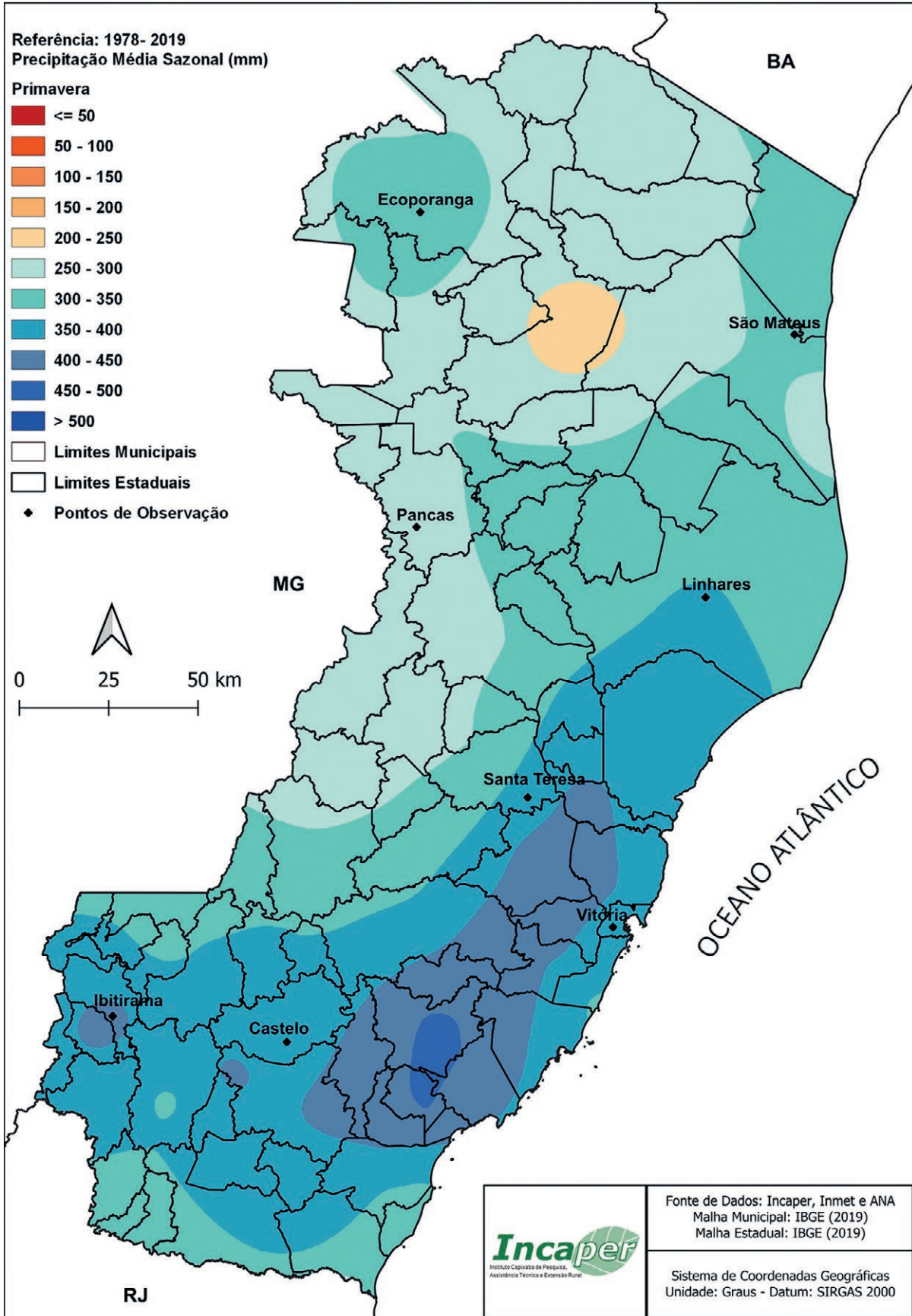
A distribuição das precipitações na primavera varia consideravelmente entre as diferentes regiões do Estado. Nas regiões do Caparaó, Grande Vitória e no leste da Região Serrana, os acumulados de precipitação costumam ultrapassar os 400 mm (400–450 mm), superando os 500 mm na porção entre Alfredo Chaves, Anchieta e Iconha, como reflexo da influência das condições orográficas e da proximidade com o oceano. Nas demais partes das regiões Sul e Serrana, bem como na Região Nordeste, os totais de precipitação geralmente variam entre 350 e 400 mm. Já nas áreas mais ao Norte e ao Oeste do Estado, os valores observados ficam entre 250 e 300 mm, e abaixo dos 200 mm entre São Mateus e Nova Venécia, indicando uma transição gradual para o regime chuvoso, mas ainda com a presença de períodos mais secos (mapa 6.7).

MAPA 6.6 Precipitação média durante o inverno (1978-2019) no Espírito Santo (mm)



Fonte: Coordenação de Meteorologia do Incaper – Atlas Climatológico do Espírito Santo, 2024.

MAPA 6.7 Precipitação média durante a primavera (1978-2019) no Espírito Santo (mm)



 Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural	Fonte de Dados: Incaper, Inmet e ANA Malha Municipal: IBGE (2019) Malha Estadual: IBGE (2019)
	Sistema de Coordenadas Geográficas Unidade: Graus - Datum: SIRGAS 2000

Fonte: Coordenação de Meteorologia do Incaper – Atlas Climatológico do Espírito Santo, 2024.

O padrão climático da primavera no Espírito Santo tem grande relevância para diversas atividades econômicas e para a gestão de recursos naturais. O aumento das chuvas é vital para a preparação das lavouras para o verão, enquanto as quedas temporárias de temperatura associadas às frentes frias podem afetar culturas mais sensíveis. Além disso, a variabilidade climática característica da primavera requer uma gestão cuidadosa dos recursos hídricos, especialmente em áreas onde os reservatórios dependem das chuvas para seu reabastecimento.

Compreender plenamente as complexidades da primavera no Espírito Santo exige considerar como os diversos fatores meteorológicos e geográficos interagem para moldar o clima da estação. Estudos de climatologia regional e o monitoramento contínuo das condições atmosféricas são fundamentais para prever e mitigar os impactos das mudanças climáticas durante esse período de transição. Dessa forma, a primavera, com suas rápidas transformações e contrastes, desempenha um papel essencial na preparação do Estado para o verão que se sucede.

A *variação sazonal* das temperaturas no Espírito Santo é marcada pela influência das massas de ar que atuam na região. As menores médias anuais de mínimas e máximas ocorrem entre junho e agosto, durante o inverno, quando as invasões de ar frio são mais intensas e frequentes, e a insolação é reduzida devido à posição do hemisfério sul em relação ao Sol. Por outro lado, as temperaturas médias anuais mais elevadas são registradas no verão, entre janeiro e março, período de maior insolação e menor influência de massas de ar frio. No mês de dezembro, além das mínimas um pouco mais elevadas, observa-se também o pico da estação chuvosa, o que contribui para uma modulação das temperaturas nesse período.

No estudo de Sá et al. (2012), as temperaturas no Espírito Santo foram estimadas utilizando a metodologia desenvolvida inicialmente por Feitosa et al. (1980). Esse estudo oferece uma visão abrangente das variações térmicas ao longo do Estado, revelando a diversidade climática que caracteriza a região.

Essas variações térmicas são fundamentais para a compreensão do clima capixaba e para o planejamento em setores como agricultura, energia e

recursos hídricos, nos quais as condições climáticas desempenham um papel crucial na determinação das práticas e estratégias a serem adotadas.

De acordo com o Atlas Climatológico do Espírito Santo, do Incaper (2024), a climatologia (1979–2019) da temperatura média no Espírito Santo varia também significativamente conforme as regiões do Estado, influenciada por fatores como altitude, proximidade do litoral e características específicas de cada microrregião.

Regiões Norte e Noroeste: estas áreas, especialmente próximas à divisa com a Bahia e Minas Gerais, apresentam um clima tropical com temperaturas médias mais elevadas ao longo do ano, sobretudo nos municípios de São Mateus, Nova Venécia e Colatina. A temperatura média anual fica entre 24°C e 26°C, com verões quentes e invernos mais amenos.

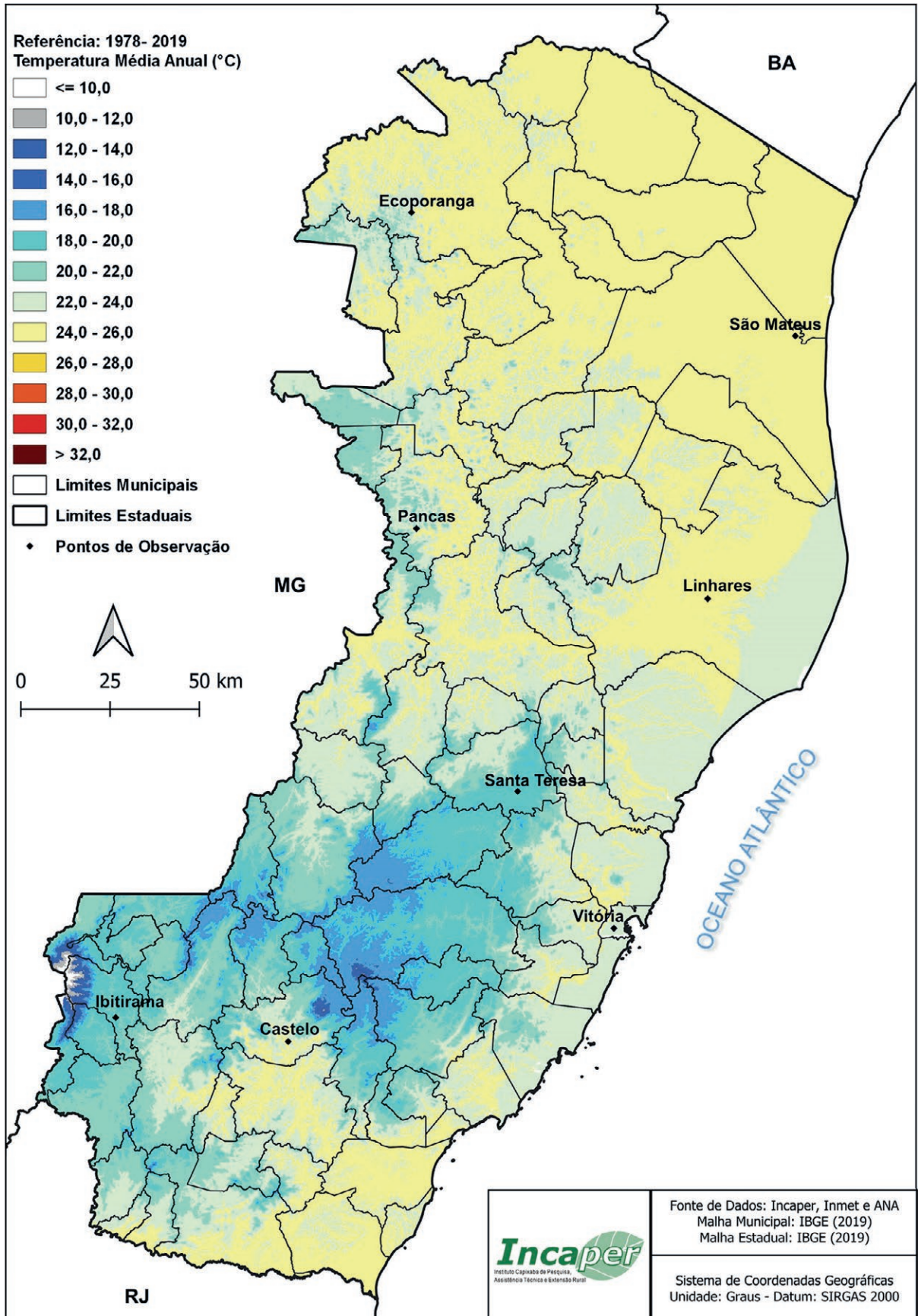
Região Serrana: composta por municípios como Santa Teresa, Venda Nova do Imigrante e Domingos Martins, esta região é caracterizada por um clima mais ameno devido à altitude. As temperaturas médias anuais ficam em torno de 16°C a 18°C, com alguns pontos mais altos da região com a média anual entre 14°C e 16°C, sendo que durante os invernos podem registrar médias inferiores a 12°C, tornando esta a região a mais fria do Estado.

Grande Vitória: a Região Metropolitana da Grande Vitória, incluindo a capital Vitória, tem um clima tropical de litoral, com temperaturas médias anuais em torno de 22°C a 24°C. A proximidade com o mar modera as temperaturas, com verões quentes e úmidos e invernos mais secos e levemente frescos.

Região Sul: englobando municípios como Cachoeiro de Itapemirim e Alegre, a Região Sul tem uma variação climática interessante, com áreas de altitude moderada no Caparaó que esfriam as temperaturas médias, e áreas de baixadas mais quentes. As médias podem variar de 22°C a 24°C, na porção central e litoral da região, média entre 18°C a 20°C, nas partes mais altas dependendo da distância do litoral, e nas partes mais altas próximas ao Caparaó, atingindo média abaixo de 12°C.

Esses dados são corroborados pelo novo Atlas Climatológico do Espírito Santo, que detalha as variações e os comportamentos climáticos em cada uma dessas regiões, auxiliando no planejamento agrícola e em outras atividades dependentes do clima (mapa 6.8).

MAPA 6.8 Temperatura média anual. Climatologia de (1978-2019) no Espírito Santo (°C)



Fonte: Coordenação de Meteorologia do Incaper – Atlas Climatológico do Espírito Santo, 2024.

6.3 Temperaturas no Espírito Santo

DURANTE O VERÃO

O verão no Espírito Santo é marcado por variações significativas nas temperaturas médias, refletindo as particularidades geográficas do Estado, como altitude e proximidade do mar. Essas diferenças são especialmente evidentes quando se comparam às temperaturas máximas e mínimas entre a Região Serrana e as outras áreas.

Na Região Serrana, a altitude desempenha um papel central na moderação das temperaturas. Durante o verão, as temperaturas máximas médias situam-se entre 24°C e 26°C (mapa 6.9). Essa faixa térmica, relativamente amena, contrasta com as áreas de menor altitude e é resultado direto da influência do relevo na circulação atmosférica e no processo de resfriamento do ar.

Por outro lado, nas demais regiões do Espírito Santo, nas quais as superfícies são mais planas e estão próximas ao litoral, as temperaturas máximas médias durante o verão são mais elevadas, com variação entre 30°C e 32°C. Esse aumento térmico é particularmente acentuado nas áreas litorâneas e no interior, onde a radiação solar direta, combinada com a menor elevação do terreno, resulta em um aquecimento mais intenso da superfície. Nesses locais, a atuação de sistemas de alta pressão durante o verão pode intensificar a radiação solar e reduzir a formação de nuvens, contribuindo para dias extremamente quentes.

As temperaturas mínimas médias, registradas durante a madrugada e o início da manhã, também exibem variações regionais notáveis. Na Região Serrana, as mínimas médias variam entre 12°C e 14°C e proporcionam noites frescas, em oposição aos dias quentes (mapa 6.10). A altitude, associada à capacidade do solo e da vegetação de perder calor rapidamente durante a noite, contribui para esse resfriamento mais acentuado. Essas noites mais frescas são benéficas tanto para o conforto humano quanto para a agricultura, permitindo uma recuperação noturna das plantas e a redução da proliferação de pragas.

Em contraste, nas demais regiões do Estado, as temperaturas mínimas médias situam-se

entre 21°C e 23°C, com o registro de noites quentes e úmidas (mapa 6.10). Nessas áreas, a proximidade do mar desempenha um papel de moderador térmico e reduz a amplitude térmica diária, mantendo as temperaturas noturnas em níveis elevados. Isso pode causar desconforto térmico durante a noite e favorecer a proliferação de mosquitos e outros vetores de doenças.

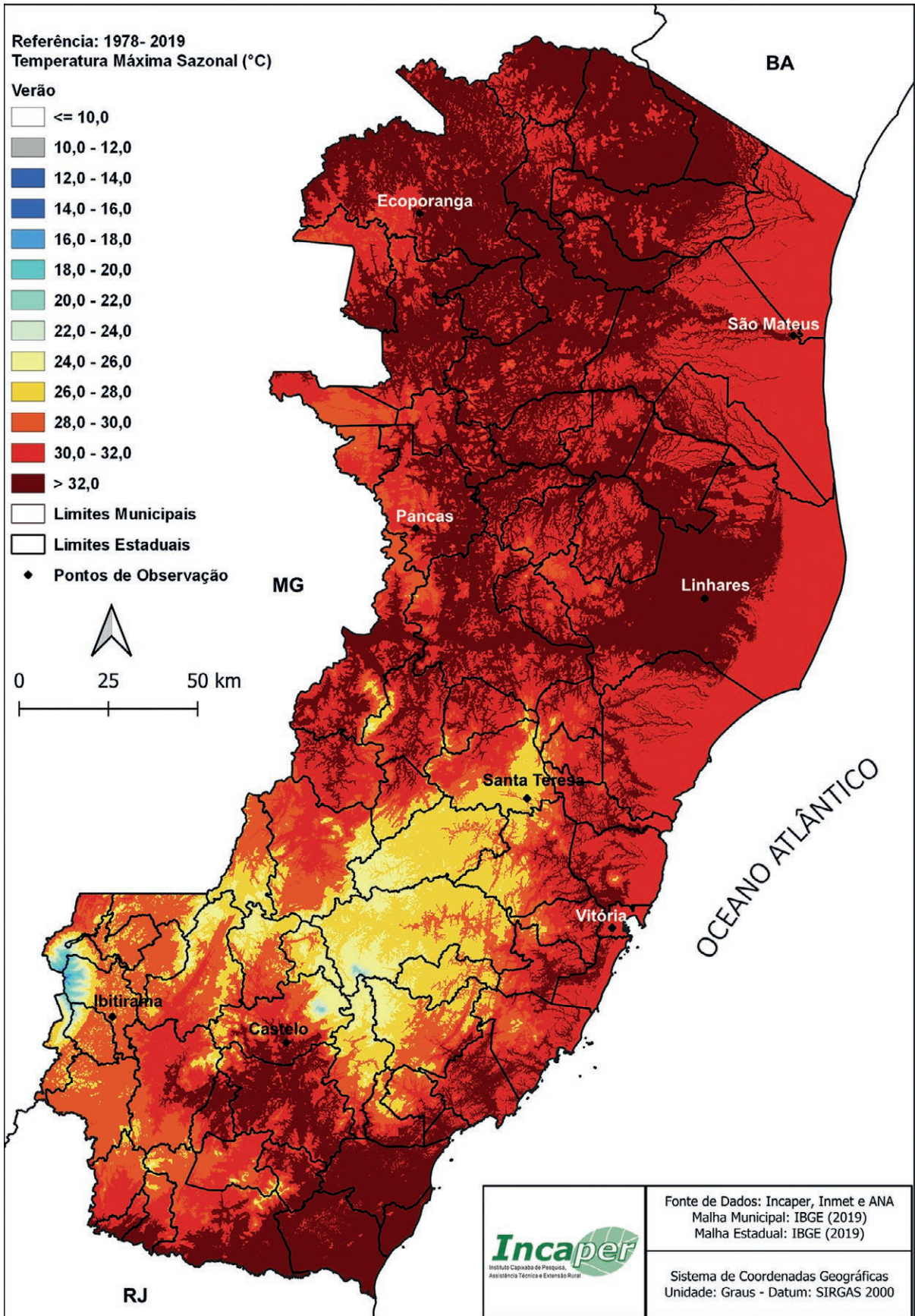
Essas variações térmicas têm importantes implicações para o Espírito Santo, afetando desde a agricultura até o consumo de energia. A escolha dos cultivos, os períodos de plantio e colheita e as demandas energéticas são diretamente influenciados por essas diferenças regionais nas temperaturas. Compreender esses padrões é essencial para o planejamento e a gestão de recursos no Estado, especialmente em um cenário de mudanças climáticas globais. Dessa forma, as temperaturas médias de verão no Espírito Santo não são apenas indicadores climáticos, mas também fatores cruciais para a adaptação às futuras condições climáticas e para a mitigação de seus impactos.


Durante o verão capixaba, as altas temperaturas associadas à elevada irradiação solar e aos dias mais longos oferecem condições ideais para a geração de energia fotovoltaica. As temperaturas máximas médias elevadas, especialmente nas regiões litorâneas, favorecem a produção de energia – embora o calor excessivo possa reduzir a eficiência dos painéis solares. Todavia, o alto índice de radiação solar durante esta estação compensa essa perda de eficiência, tornando o verão o período mais produtivo para a energia solar no Estado.

DURANTE O OUTONO

Durante o outono no Espírito Santo, as temperaturas mostram uma transição gradual do calor intenso do verão para as condições mais amenas e estáveis do inverno. Essa estação caracteriza-se por variações significativas nas condições climáticas entre as diferentes regiões do Estado, especialmente quando se comparam as áreas serranas com as regiões de menor altitude e litorâneas.

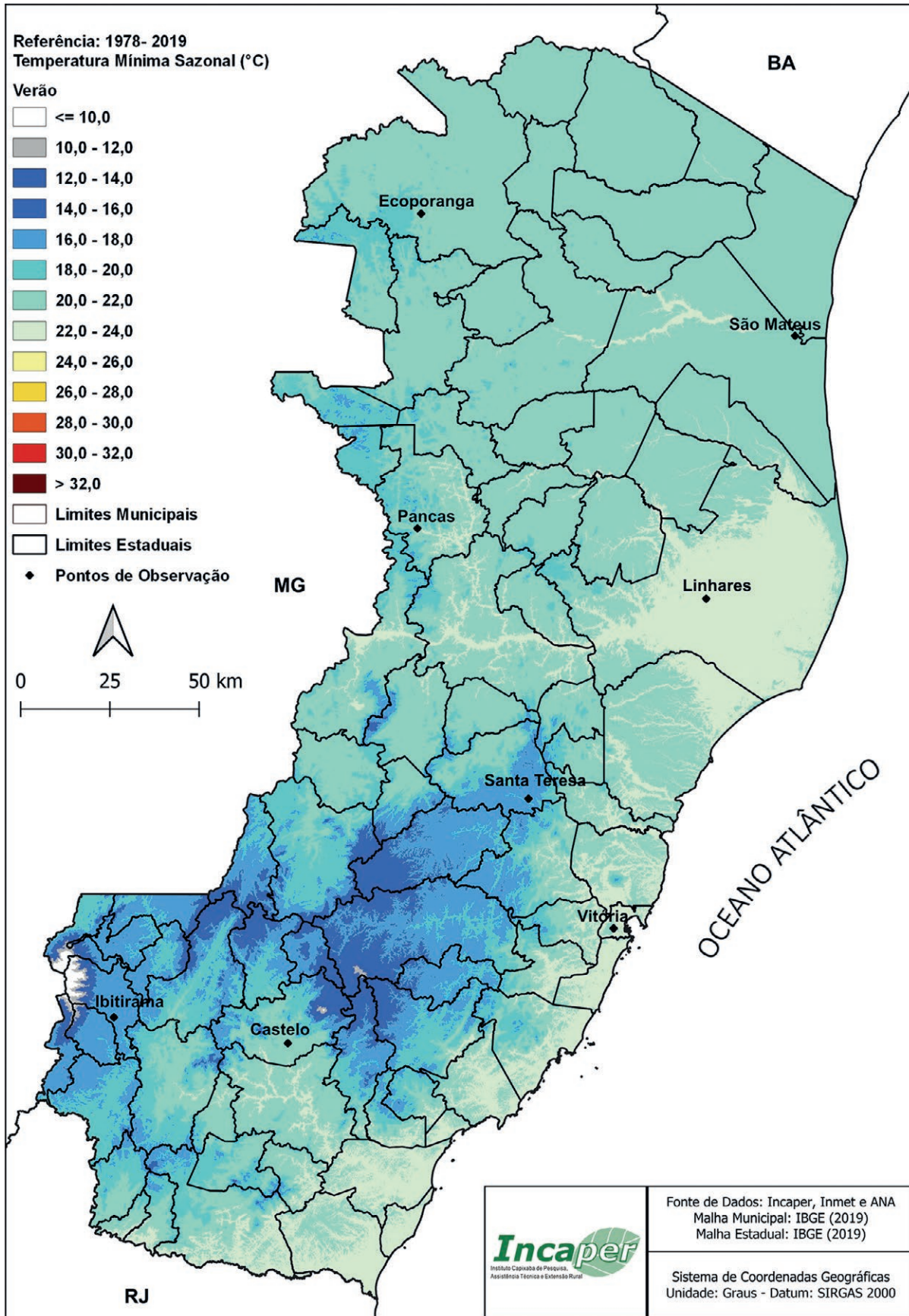
MAPA 6.9 Temperatura média máxima no Espírito Santo durante o verão (°C)



 <small>Instituto Capoverde de Pesquisas, Assistência Técnica e Extensão Rural</small>	Fonte de Dados: Incaper, Inmet e ANA Malha Municipal: IBGE (2019) Malha Estadual: IBGE (2019)
	Sistema de Coordenadas Geográficas Unidade: Graus - Datum: SIRGAS 2000

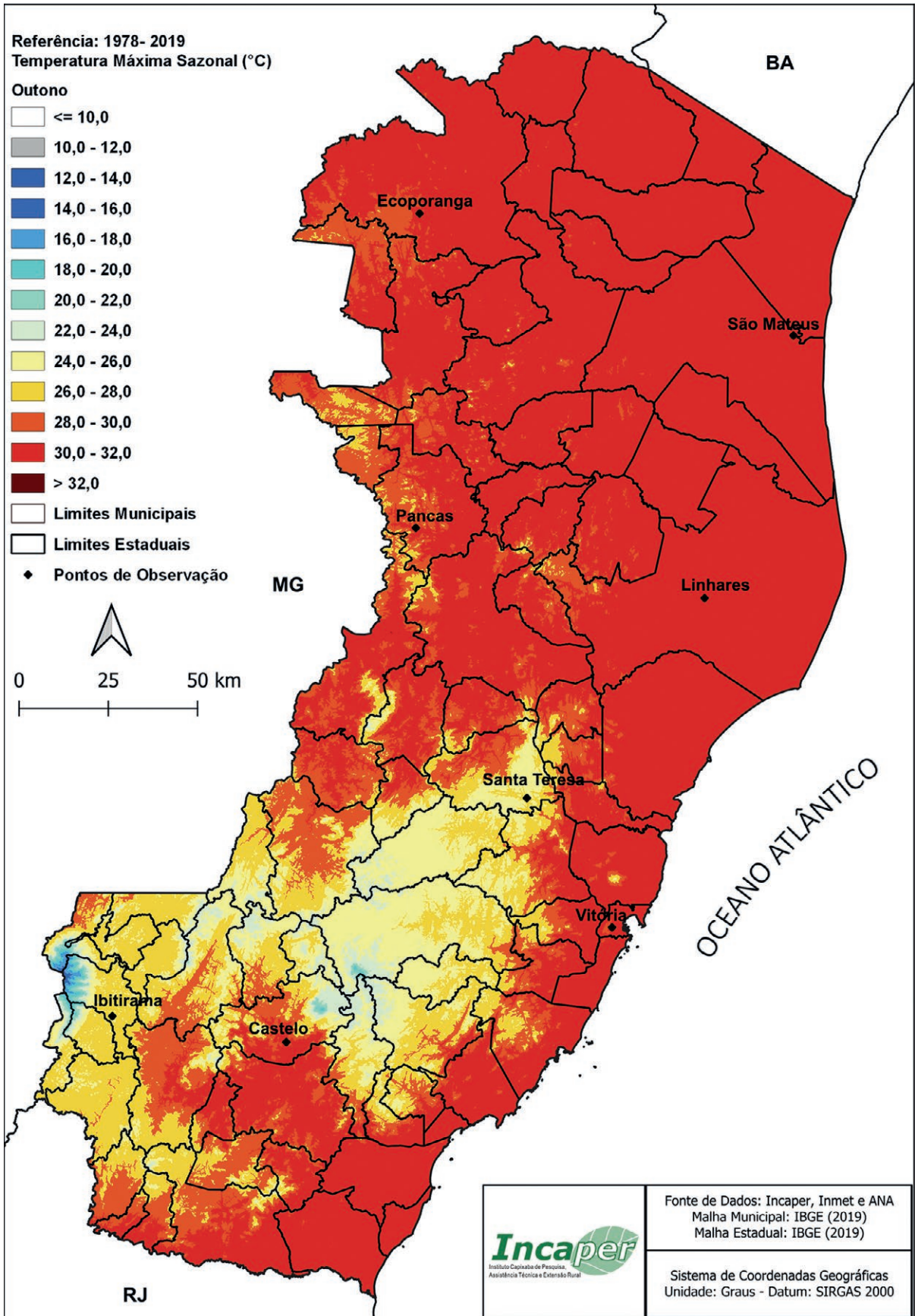
Fonte: Coordenação de Meteorologia do Incaper – Atlas Climatológico do Espírito Santo, 2024.

MAPA 6.10 Temperatura média mínima no Espírito Santo durante o verão (°C)



Fonte: Coordenação de Meteorologia do Incaper – Atlas Climatológico do Espírito Santo, 2024.

MAPA 6.11 Temperatura média máxima no Espírito Santo durante o outono (°C)



Fonte: Coordenação de Meteorologia do Incaper – Atlas Climatológico do Espírito Santo, 2024.

Na Região Serrana, que inclui municípios como Domingos Martins e Santa Teresa, as temperaturas máximas médias durante o outono tendem a estabilizar-se em torno de 26°C. Esta moderação térmica se deve principalmente à altitude elevada, que exerce um efeito de resfriamento natural, contribuindo para um clima mais fresco ao longo do dia. As mínimas médias nessa região registram valores em torno de 16 °C, com noites relativamente frias, sobretudo diante das demais regiões do Estado.

Nas regiões litorâneas e nas áreas de menor altitude, como a Grande Vitória e as planícies do Norte do Estado, as temperaturas máximas médias no outono mantêm-se mais elevadas, ao redor dos 31°C (Mapa 6.11). Esse comportamento térmico é influenciado pela menor altitude e pela proximidade do Oceano Atlântico, que exerce um papel moderador, mas que também pode reter calor, sobretudo em áreas urbanas densamente construídas. As mínimas médias nessas regiões ficam em torno de 21°C (Mapa 6.12), resultando em noites agradáveis, sem os extremos térmicos observados no inverno.

O outono no Espírito Santo é também uma estação de transição em termos de umidade e precipitação. A estação chuvosa, que se estende até o final do verão, começa a ceder espaço a um clima mais seco, especialmente a partir de abril. No entanto, eventos de chuva ainda podem ocorrer influenciados por sistemas meteorológicos como frentes frias, que eventualmente adentram o Estado a partir do Sul do País. Essas frentes são responsáveis por quedas mais acentuadas de temperatura e por episódios de precipitação que, embora menos frequentes que no verão, ainda desempenham um papel importante no regime hídrico local.

A variação térmica entre o dia e a noite no outono, conhecida como amplitude térmica, é mais pronunciada na Região Serrana. Essa característica climática tem implicações diretas na agricultura, principalmente para culturas que são sensíveis às oscilações de temperatura. A viticultura, por exemplo, beneficia-se dessas condições, uma vez que as noites mais frias e os dias amenos favorecem a qualidade das uvas.

Em resumo, o outono no Espírito Santo é

marcado por uma moderação das temperaturas, com diferenças regionais significativas que refletem a diversidade geográfica do Estado. Compreender essas variações é essencial para o planejamento agrícola, a gestão dos recursos hídricos e o desenvolvimento de políticas públicas voltadas à adaptação climática.

No outono, as temperaturas começam a cair, especialmente na Região Serrana, onde as máximas médias se estabilizam em torno de 26°C. Essa moderação térmica é benéfica para a eficiência dos painéis solares, que operam melhor em temperaturas mais amenas. Embora a duração do dia comece a diminuir, a continuidade de dias ensolarados e a redução gradual das chuvas fazem do outono uma estação favorável para a geração fotovoltaica, mantendo uma produção de energia consistente.

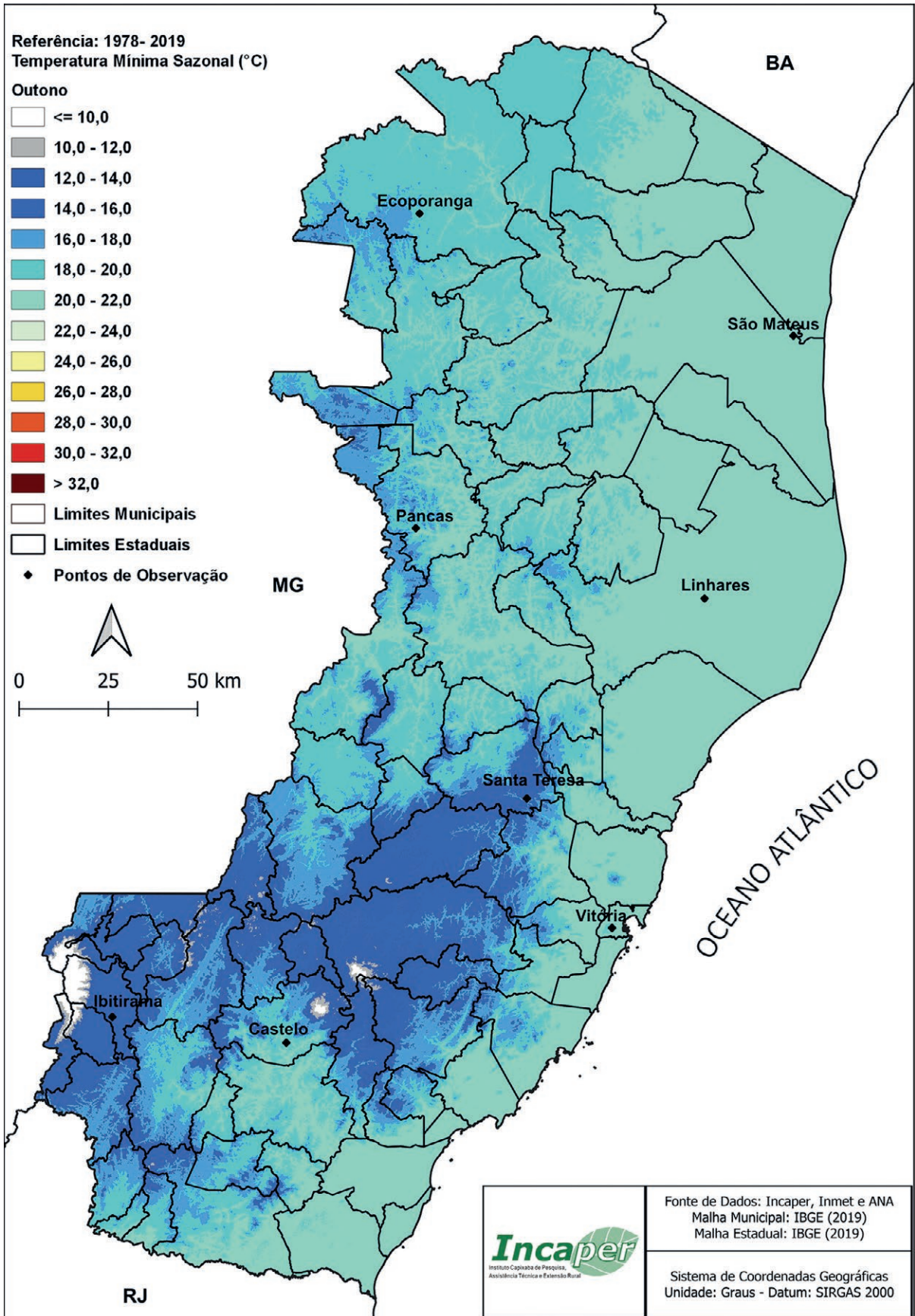
DURANTE O INVERNO

Durante o inverno no Estado do Espírito Santo, as condições climáticas apresentam um caráter marcadamente ameno, com variações de temperatura que refletem a diversidade geográfica da região. Esse período é caracterizado por um resfriamento mais acentuado nas áreas de maior altitude, especialmente na Região Serrana, e por temperaturas relativamente mais elevadas nas áreas litorâneas de menor altitude.

Na Região Serrana, de acordo com a climatologia do Espírito Santo proposta pelo Incaper (2024), nos municípios de Domingos Martins, Venda Nova do Imigrante e Santa Teresa, as temperaturas máximas médias durante o inverno ficam na faixa entre 18°C e 20°C, atingindo médias máximas entre 16°C e 18°C, em pontos mais elevados, como no distrito de Pedra Azul (mapa 6.13).

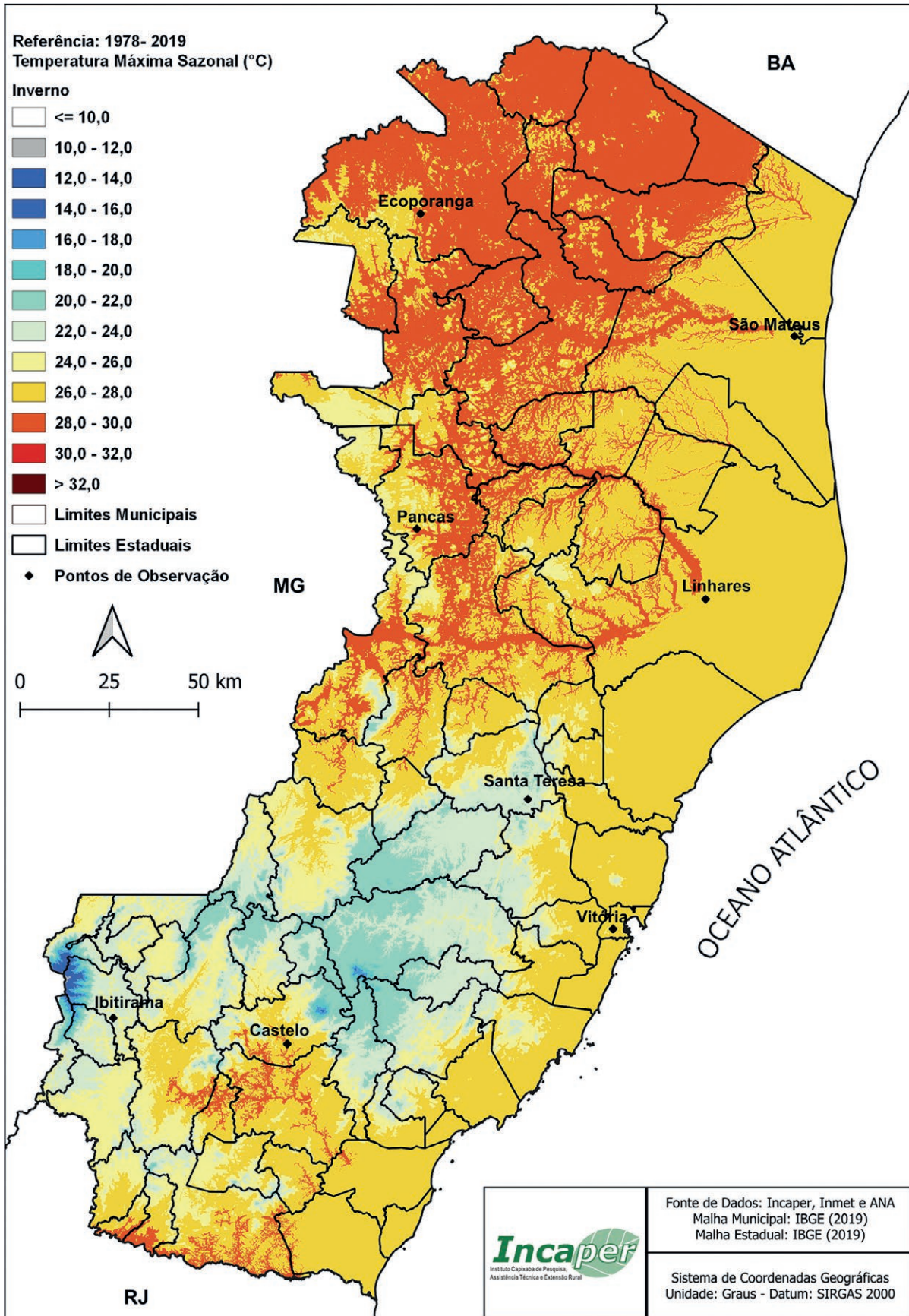
Nas regiões litorâneas e nas áreas de menor altitude, como a Grande Vitória e no Norte do Estado, as temperaturas máximas médias durante o inverno tendem a ser mais elevadas, entre 26°C e 28°C (mapa 6.13). Esse comportamento térmico é resultado da combinação entre a menor altitude e a proximidade do Oceano Atlântico, que exerce um efeito de estabilização das temperaturas, evitando quedas bruscas durante o dia. As temperaturas mínimas nessas regiões variam entre 15°C e 17°C e proporcionam noites mais

MAPA 6.12 Temperatura média mínima no Espírito Santo durante o outono (°C)



Fonte: Coordenação de Meteorologia do Incaper – Atlas Climatológico do Espírito Santo, 2024.

MAPA 6.13 Temperatura média máxima no Espírito Santo durante o inverno (°C)



Fonte: Coordenação de Meteorologia do Incaper – Atlas Climatológico do Espírito Santo, 2024.

amenas e confortáveis, sem os extremos de frio observados nas áreas serranas (mapa 6.14).

Esse padrão térmico é fortemente influenciado pela altitude, a qual atua na moderação das temperaturas diurnas. As mínimas médias nessa região são notavelmente mais baixas, variando entre $\leq 10^{\circ}\text{C}$ e 12°C , o que resulta em noites frias, frequentemente acompanhadas por nevoeiros e uma sensação térmica mais baixa devido aos ventos característicos dessas áreas montanhosas. Nas regiões mais baixas e no litoral do Estado, as temperaturas mínimas ficam entre 12°C e 18°C (mapa 6.14).

O inverno no Espírito Santo também é caracterizado por uma redução significativa nas precipitações, especialmente em comparação com os meses de verão. Esse período seco é típico do clima tropical litorâneo, predominante na maior parte do Estado. A ausência de chuvas frequentes, combinada com as temperaturas mais baixas e tempo mais seco, cria condições ideais para atividades ao ar livre e para o turismo nas regiões Serranas, nas quais a paisagem é particularmente atraente nessa época do ano.

Outro aspecto relevante do inverno capixaba é a maior amplitude térmica, ou seja, a diferença entre as temperaturas máximas e mínimas ao longo do dia. Essa característica é especialmente acentuada na Região Serrana, onde as noites frias contrastam com dias relativamente quentes e ensolarados. Esse fenômeno tem impacto direto na agricultura, pois algumas culturas, como o café arábica, beneficiam-se das noites frias para o desenvolvimento de grãos de alta qualidade.

Portanto, o inverno no Espírito Santo, embora menos rigoroso em comparação com outras regiões do Brasil, apresenta uma diversidade climática que reflete a geografia do Estado. Apresenta temperaturas mais amenas, com máximas variando entre 18°C e 28°C , dependendo da região. A menor intensidade das chuvas e a presença de dias ensolarados, combinadas com temperaturas mais baixas, proporcionam um ambiente propício para a eficiência dos sistemas fotovoltaicos. No entanto, a menor duração do dia e a incidência

solar mais baixa podem resultar em uma ligeira redução na produção de energia em comparação com o verão.

DURANTE A PRIMAVERA

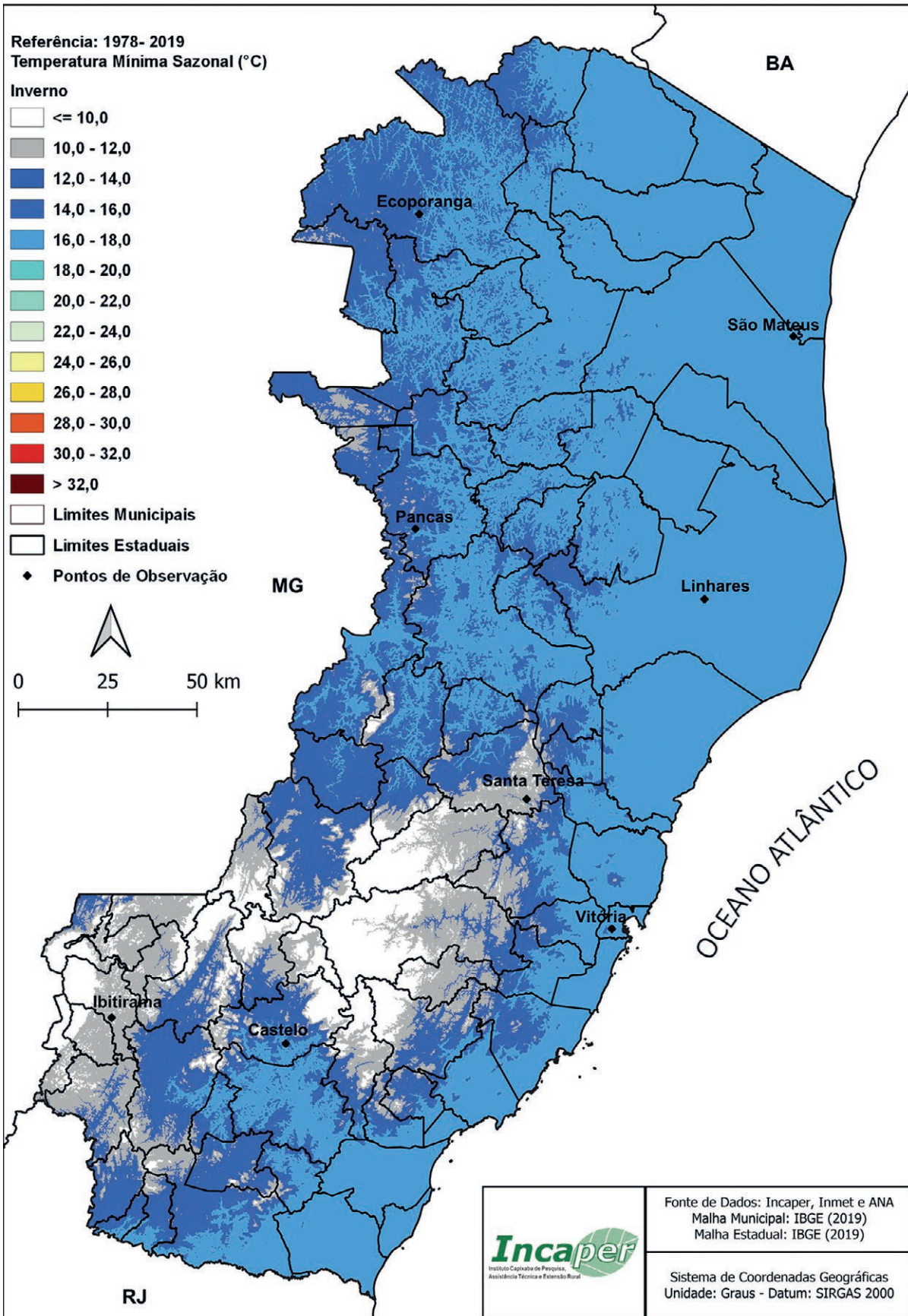
Durante a primavera no Espírito Santo, as condições climáticas revelam uma fase de transição entre o inverno ameno e o calor intenso do verão. As temperaturas, nesse período, começam a subir gradualmente, refletindo a mudança sazonal que traz umidade e calor de volta à região. As temperaturas máximas médias na primavera oscilam entre 24°C e 26°C na Região Serrana e chegam a atingir uma média de 22°C na região do Caparaó e em pontos mais elevados da região Serrana.

Nas regiões de menor altitude e litorâneas, como a Grande Vitória e o Norte do Estado, a primavera é marcada por um aquecimento mais pronunciado. As temperaturas máximas médias alcançam entre 28°C e 30°C , refletindo a proximidade do verão. Nesses locais, a influência do Oceano Atlântico, combinada com a menor elevação do terreno, contribui para temperaturas mais elevadas durante o dia, mas ainda confortáveis. As mínimas médias nessas regiões giram em torno de 19°C , o que proporciona noites agradáveis e relativamente estáveis em termos de temperatura (mapa 6.15).

Na Região Serrana, onde a altitude influencia significativamente o clima, a primavera apresenta um cenário de moderação térmica. As temperaturas máximas, embora mais elevadas do que as registradas no inverno, permanecem amenas, com dias agradáveis. Esse clima favorece o turismo ecológico e as atividades ao ar livre, que são comuns nessa época do ano em locais como Domingos Martins e, em especial, no distrito de Pedra Azul. As mínimas médias na região variam entre 12°C e 14°C . Por sua vez, em pontos mais altos, como a Serra do Caparaó, Pedra Azul e Forno Grande, as temperaturas mínimas médias tendem a ficar abaixo dos 12°C na média, mantendo as noites frescas, sobretudo nas áreas de maior altitude (mapa 6.16).

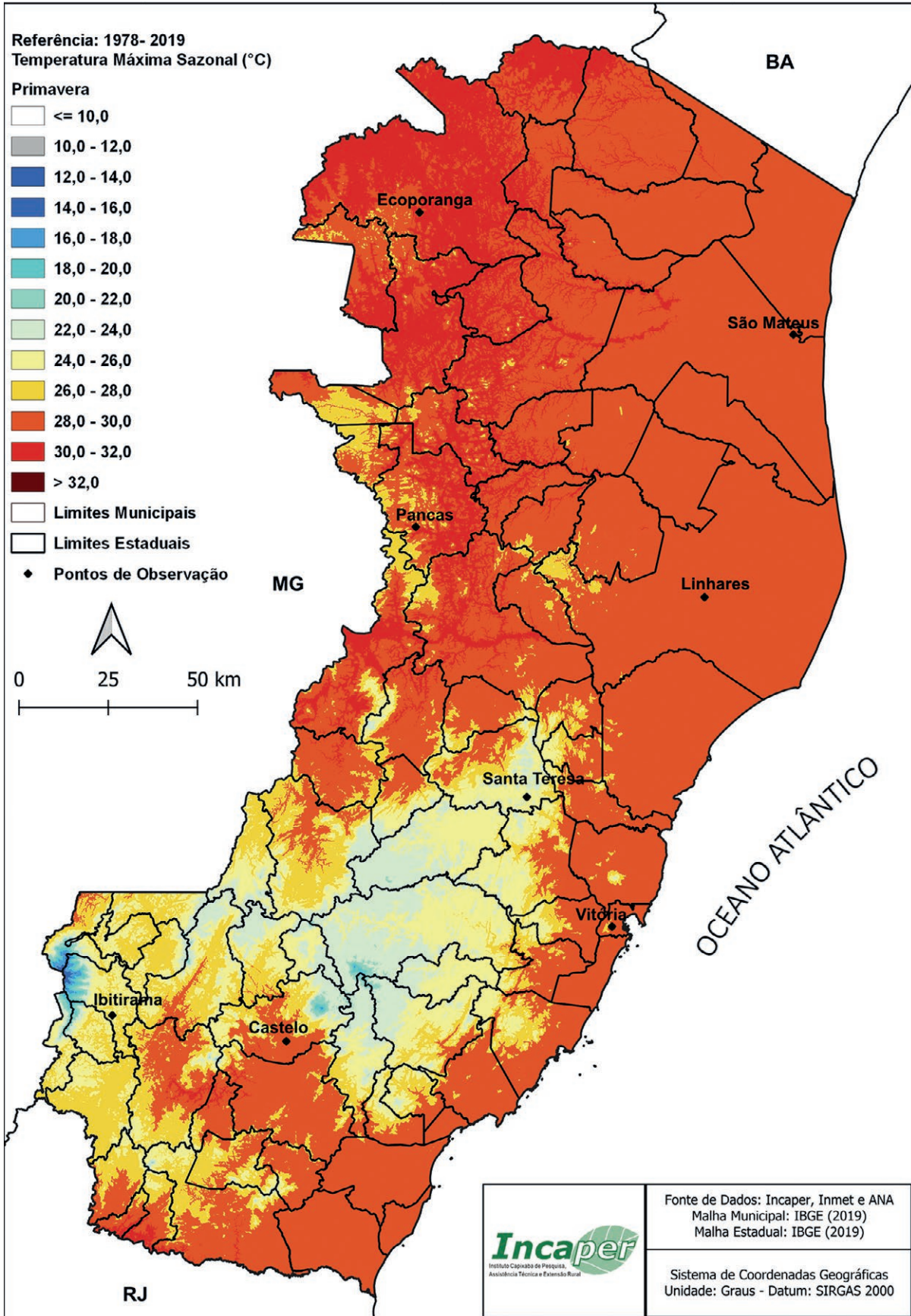
Além da elevação das temperaturas, a primavera no Espírito Santo é caracterizada

MAPA 6.14 Temperatura média mínima no Espírito Santo durante o inverno (°C)

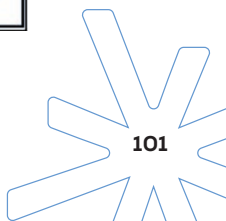


Fonte: Coordenação de Meteorologia do Incaper – Atlas Climatológico do Espírito Santo, 2024.

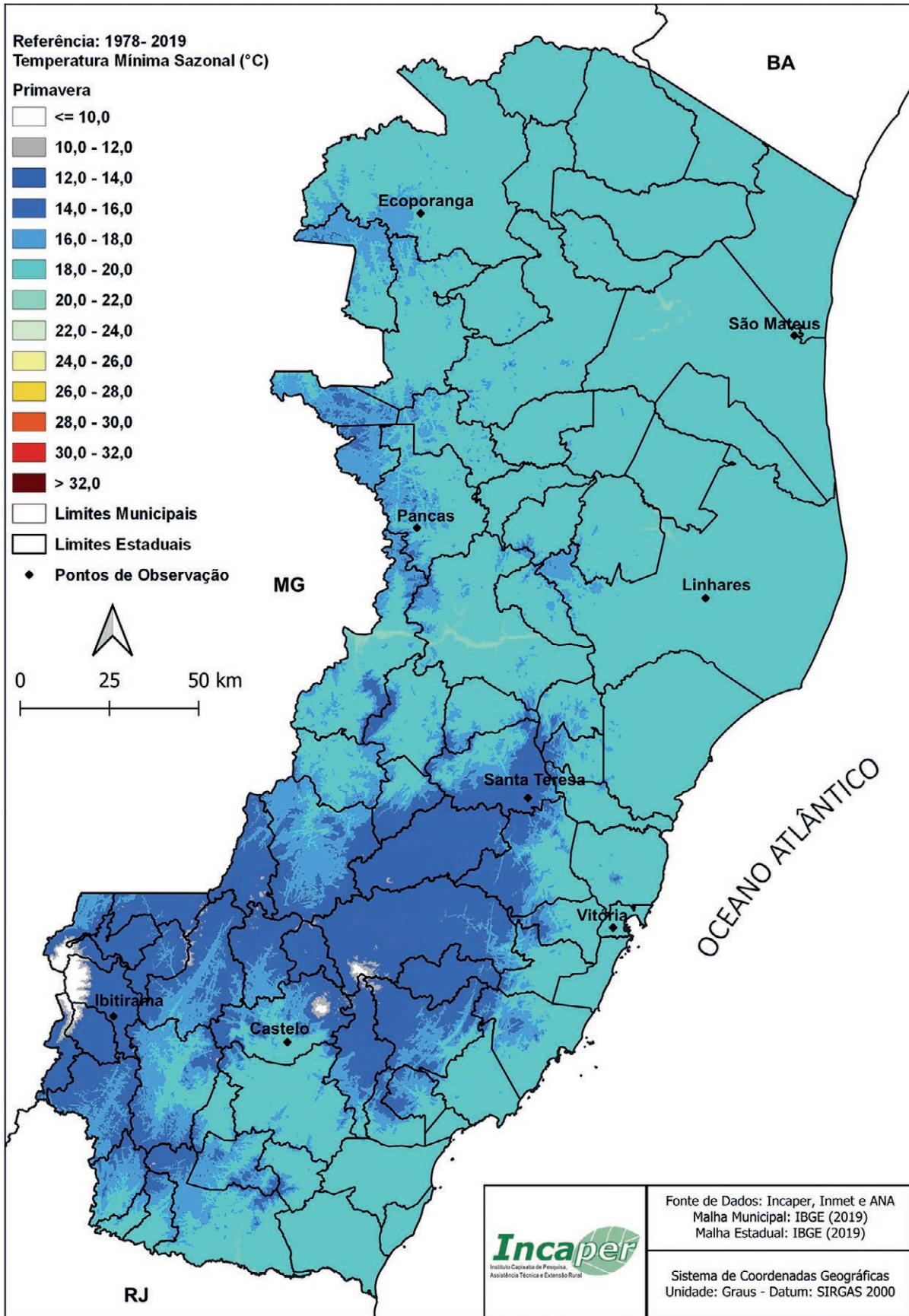
MAPA 6.15 Temperatura média máxima no Espírito Santo durante a primavera (°C)



Fonte: Coordenação de Meteorologia do Incaper – Atlas Climatológico do Espírito Santo, 2024.



MAPA 6.16 Temperatura média mínima no Espírito Santo durante a primavera (°C)



Fonte: Coordenação de Meteorologia do Incaper – Atlas Climatológico do Espírito Santo, 2024.

por um aumento na umidade e na frequência de chuvas. O retorno das precipitações é impulsionado pela formação de sistemas meteorológicos típicos da estação, como a atuação de frentes frias e a intensificação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Esse aumento da umidade prepara o Estado para o período de maior concentração de precipitações típico do verão, sendo crucial para a agricultura local, que depende dessas chuvas para o desenvolvimento de culturas como o café e o cacau.

Outro aspecto importante da primavera capixaba é a variabilidade atmosférica, influenciada por fatores termodinâmicos que aquecem a superfície terrestre, os quais pode resultar em dias de calor intenso seguidos por quedas repentinas de temperatura, especialmente devido à passagem de frentes frias. Essa variabilidade exige adaptações tanto na agricultura quanto

nas atividades cotidianas da população, que precisa estar preparada para essas oscilações.

Em síntese, a primavera no Espírito Santo é uma estação de transição e preparação para o verão, marcada por um aumento gradual das temperaturas e pela retomada das chuvas. A compreensão das particularidades climáticas dessa estação é essencial para o planejamento agrícola, a gestão de recursos hídricos e o turismo, setores que são diretamente influenciados pelas condições meteorológicas da região.

Apesar do aumento da umidade, a estação ainda oferece um bom equilíbrio entre temperaturas favoráveis e alta incidência solar. A variabilidade climática da primavera, com dias de sol intercalados por chuvas, pode impactar a produção de energia fotovoltaica, mas a estação, como um todo, continua a ser um período eficiente para a geração de energia solar, à medida que os dias se alongam e as temperaturas sobem gradualmente.



CAPÍTULO

7.

Energia Solar
na Agropecuária
e Silvicultura

Na produção agropecuária e na silvicultura em geral, a energia vinda do sol é essencial para o desenvolvimento metabólico de plantas e animais. Ela é responsável pelos vários processos que ocorrem no ambiente agrícola, por exemplo, aquecimento do ar (temperatura), evaporação da água, fotossíntese, indução ou inibição de processos fisiológicos de plantas e animais, turbulência do ar, entre outros^[44].

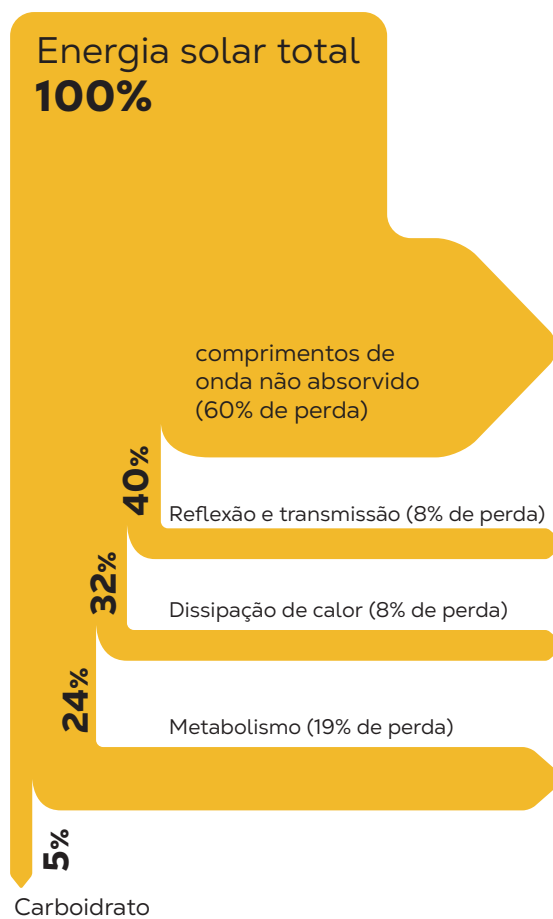
Estudos realizados por Campos (2004)^[32] apontam que, no Brasil, existem diversas formas de conduzir dada cultura ou criar determinada espécie animal. Fatores como tipo de solo e topografia (inclinação, altitude, exposição solar) do terreno podem provocar diferenças consideráveis no consumo energético. A energia solar pode ser considerada gratuita, apresentando custo de oportunidade zero e sua não-contabilização, como ressalta Comitre (1993), não implica maiores restrições ao método do balanço energético no ambiente agrícola^[35]. Isso indica que, em uma mesma região, sistemas produtivos distintos poderão acarretar diferenças na eficiência energética se o produtor optar por alternativas energéticas de baixo custo, o que pode influenciar no custo final do produto de origem animal ou vegetal.

As plantas estão entre os principais responsáveis pela fixação química da energia solar na biosfera terrestre. Segundo Sentelhas e Monteiro (2009)^[45], a radiação solar provê a energia necessária aos processos associados à fotossíntese, afetando a produção de carboidratos e o crescimento da biomassa vegetal. A região do espectro compreendida entre **400 e 700 nm** (região do visível) possui a radiação útil para a fotossíntese, sendo esta denominada **Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA)**, ou, em inglês, Photosynthetically Active Radiation (**PAR**). Cerca de 85 a 90% da PAR são absorvidos pela folha, sendo o restante refletido na sua superfície ou transmitido por meio dela.

Aproximadamente $1,3 \text{ kW/m}^2$ da energia radiante solar atinge a Terra, porém somente cerca de **5% dessa energia** é convertida em carboidratos pelo processo de fotossíntese, conforme a representação esquemática de Taiz

e Zeiger (1998), mostrada na figura a seguir. Segundo Carvalho (2004), do total da energia solar, as plantas armazenam no seu metabolismo **0,02%**. Isso representa, em valores, um total de $3,04 \times 10^{11} \text{ MWh/ano}$, o equivalente a 2,6 vezes o consumo mundial energético em 2017, em torno de $1,16 \times 10^{11} \text{ MWh/ano}$ ^[89], somando-se todas as fontes geradoras para as necessidades humanas.

FIGURA 7.1 Diagrama da conversão de energia solar em energia química (carboidratos) pelas folhas



Fonte: (Taiz & Zeiger, 1998).

De acordo com a metodologia adotada por Junqueira *et al.* (1982), o **produto da radiação solar** utilizada na fotossíntese e consumido na agricultura é classificado como **energia** convertida em **produto final**, utilizada na manutenção e no crescimento de animais e plantas, ou armazenada na forma de alimento ou material combustível. Esse material está contido nos nutrientes do solo e nos fertilizantes – ou nos alimentos, no caso de animais.

FIGURA 7.2 Cultura de café e banana no município de Água Doce do Norte, ES



Fonte: Cortesia Incaper, 2011.

SECADOR SOLAR

O aproveitamento do calor do sol por meio de secadores solares tem sido desenvolvido e incentivado com a produção de manuais,

como o produzido pela Escola Superior de Agricultura (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP) e Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Energias Renováveis (IDER)^[71]. Vejamos.

FIGURA 7.3 Secador solar tipo gaveta e tipo túnel

a) Secador solar tipo gaveta



b) Secador solar tipo túnel

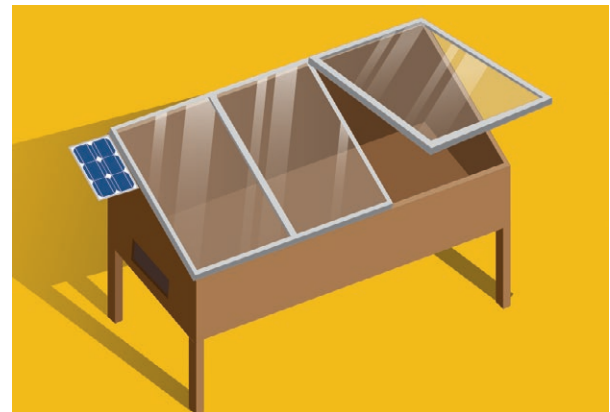


FIGURA 7.4 Culturas de frutas, verduras e legumes



Para as atividades pecuárias e manejo zootécnico, quando os animais são criados em locais que ofereçam uma zona de conforto térmico adequado, eles tenderão a maximizar a sua capacidade produtiva em um menor tempo, o que possibilita um

maior rendimento de acordo com o padrão genético. Segundo Lee *et al.* (1974), a radiação solar é uma das principais variáveis meteorológicas influentes nos processos fisiológicos do animal. Nesse contexto, a quantidade de radiação que incide sobre

os animais apresenta grande influência sobre seu equilíbrio térmico. Conforme Nããs (1989)^[37], a absorção e a reflexão da radiação solar variam entre

raças, linhagens e indivíduos, existindo variabilidades individuais quanto à capacidade de dissipar e absorver o calor existente no meio.

FIGURA 7.5 Criação de aves, suínos e bovinos



BENEFÍCIOS DO USO DA ENERGIA SOLAR NO MEIO RURAL

Tradicionalmente, os produtores rurais têm sido reconhecidos como os administradores da terra, muitas vezes, influenciando a economia e a política nas comunidades à sua volta ou até em em âmbito nacional. O investimento em energia renovável veio dar suporte ao papel desses administradores em proteger a terra, o ar e a água. A energia solar oferece uma oportunidade, junto às outras energias renováveis, para a estabilidade nos custos de energia e para a diminuição na poluição, em especial, a redução na emissão dos gases de efeito estufa, além de mitigar a necessidade imediata de melhorias na rede elétrica, por meio do uso de mini e microgeração distribuída^[31].

Basicamente, existem dois tipos de sistemas de aproveitamento da energia solar. O primeiro, a energia fotovoltaica, que converte a energia solar em eletricidade de corrente contínua. Muito econômica em localidades remotas, pode ser usada no meio rural para fornecer energia para bombas d'água, iluminação, pequenos motores, ventiladores de arejamento, irrigação, alimentadores automáticos, refrigeração de produtos, compressores e bombas, usados na piscicultura, carregamento de baterias e cercas elétricas^{[36] [46] [42] [34]}.

O segundo tipo de sistema **aproveita o calor proveniente da radiação solar**. Aquecedores alimentados por energia solar podem ser utilizados em instalações pecuárias, como é o caso das fazendas que condicionam o ambiente para maximizar a saúde e o crescimento de animais como suínos ou aves. De forma similar, o sistema de aquecimento também pode ser útil no desenvolvimento de plantas em **estufas**, por controlar a temperatura (em especial nas regiões que se encontram na estação fria).

O uso de calor solar para **aquecer o ar** também é de muita serventia na secagem de cultivos e grãos. Diferentemente da tradicional secagem ao ar livre, os secadores mais sofisticados protegem os produtos, reduzem perdas, aceleram o processo, garantem maior conformidade e oferecem melhores condições de higiene, resultando em um material de qualidade superior. A única desvantagem desses secadores é o alto custo dos coletores solares, mas esse aspecto pode ser compensado pelo seu uso para outros fins em épocas diferentes do ano.

Em relação aos **aquecedores de água via energia solar**, é comprovada sua utilidade em prover água quente para operações diárias na fazenda, como a essencial limpeza de aviários, requerida periodicamente, além do próprio uso doméstico^{[34] [48]}.

FIGURAS 7.6 Agricultores em estufa de secar café e estufa de secar café em uso


NOTA: Agricultores de Água Branca (ES) visitam estufa de secagem de café na propriedade de Ozílio Partelli, em Vila Valério (ES). Fonte: Incaper, 2013.

BOMBEAMENTO DE ÁGUA POR ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

O bombeamento de água por meio da energia solar fotovoltaica pode ser feito por sistemas de painéis instalados nos terrenos, no solo e nos espelhos d'água disponíveis na fazenda, ou nas edificações. Um sistema fotovoltaico para bombeamento de água em áreas rurais, especialmente em sistemas isolados, é uma solução eficiente e sustentável para a irrigação agrícola e o fornecimento de água potável. Essas estruturas utilizam painéis solares para captar energia solar e convertê-la em eletricidade, que é então usada para acionar bombas de água.

Para um sistema de bombeamento solar eficaz, é essencial considerar a demanda de água, a disponibilidade de radiação solar na região e a altura manométrica, que é a diferença de elevação entre a fonte de captação de água e o ponto de uso ou armazenamento. Os painéis solares devem ser instalados em locais com alta

exposição solar e orientados corretamente para maximizar a eficiência.

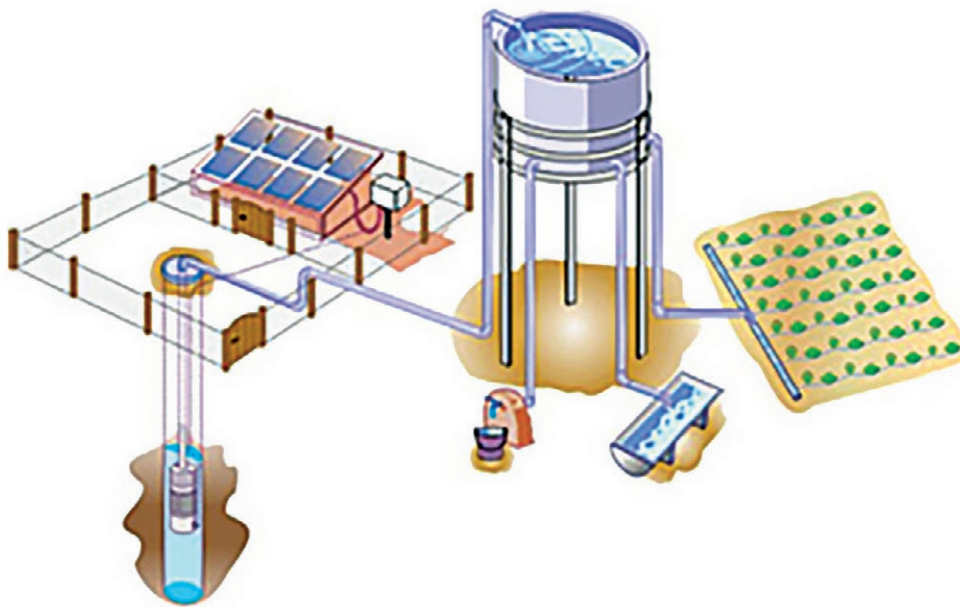
Os componentes principais de um sistema de bombeamento solar incluem, além de painéis solares, controlador de carga, baterias (para sistemas que operam fora da rede), inversores (se necessário converter a corrente contínua dos painéis em corrente alternada para a bomba) e a própria bomba de água. As bombas podem ser de corrente contínua (CC ou DC, direct current) para aplicações menores, ou de corrente alternada (AC) para aplicações maiores, utilizando inversores adequados.

A instalação requer atenção especial à montagem segura dos painéis, à conexão correta dos componentes elétricos e hidráulicos e à realização de testes para garantir o funcionamento apropriado. A manutenção regular é crucial para manter a eficiência do sistema, incluindo a limpeza dos painéis solares e a verificação dos componentes elétricos e hidráulicos.

FIGURA 7.7 Exemplos de formas de uso da energia solar na irrigação (sistema isolado, off-grid)


Fonte: Incaper

FIGURA 7.8 Diagrama de um sistema fotovoltaico de bombeamento com aplicações para irrigação, consumo humano, animal e controlado (sistema isolado)



Fonte: MORALES^[18], 2011. Arquivo gráfico do LSF-IEE.

A utilização da energia solar consiste uma alternativa ao uso de combustíveis, como que-rosene, gás propano e diesel, uma vez que eles são poluentes, não renováveis e dispendiosos nos requisitos transporte, volatilidade e derramamento. Além disso, são utilizados em geradores barulhentos, que produzem gases tóxicos e precisam de manutenção frequente. Dessa forma, sistemas de aproveitamento da radiação solar modernos, bem projetados, de fácil manutenção e com bom custo-benefício podem ser uma fonte de energia de qualidade quando e onde esta energia for requerida^[48].

Em suma, o uso da energia solar na agricultura e pecuária é, em muitos casos, menos dispendioso quando comparado à instalação de extensas linhas elétricas para o suprimento de energia. A utilização dessa fonte de energia sustentável certamente tem potencial para tornar as fazendas mais econômicas e eficientes^[34].

Além disso, a energia solar oferece uma solução ambientalmente amigável, reduzindo a emissão de gases de efeito estufa e a pegada de carbono das atividades agrícolas e pecuárias. A adoção de tecnologias solares pode ajudar a mitigar os impactos das mudanças

climáticas, por meio de práticas mais sustentáveis no setor rural.

A energia solar também proporciona uma fonte de energia resiliente e confiável em áreas remotas, onde a infraestrutura de energia convencional pode ser inadequada ou inexistente. Sistemas solares fotovoltaicos para bombeamento de água, por exemplo, garantem o fornecimento diário hídrico para irrigação e consumo animal, independentemente das condições climáticas e da disponibilidade de combustíveis fósseis.

A inovação contínua na tecnologia solar, como o desenvolvimento de painéis solares mais eficientes e sistemas de armazenamento de energia, também está tornando essa fonte de energia mais acessível e viável economicamente. O investimento em energia solar possibilita economias significativas a longo prazo, além de melhorar a independência energética dos produtores rurais.

A implementação de soluções energéticas solares no meio rural fomenta o desenvolvimento econômico local, criando empregos em instalação, manutenção e operação dos sistemas. Isso contribui para o fortalecimento das comunidades rurais e para um desenvolvimento mais equilibrado e sustentável.

FIGURA 7.9 Sistema fotovoltaico para bombeamento de água rural (sistema isolado)



Fonte: Critéria Energia Solar.



CAPÍTULO

8.

Mecanismos
de Incentivo à
Energia Solar

Neste capítulo, são apresentados os principais mecanismos de incentivo à energia solar oferecidos no âmbito federal, pelo Estado do Espírito Santo e por outras unidades federativas.

8.1 Mecanismos de incentivos federais

Ao longo dos anos, até a presente edição do Atlas Solar do Espírito Santo, identificou-se que, no âmbito federal, foram criadas resoluções normativas e firmados convênios pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) com o objetivo de viabilizar a geração por fontes renováveis de energia, propiciando a inserção da energia gerada na rede elétrica. Trata-se de um processo dinâmico que passa por atualizações. Abaixo seguem alguns exemplos deste contexto histórico.

- **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 77^[23], DE 18 DE AGOSTO DE 2004** Estabelece os procedimentos vinculados à redução das tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, para empreendimentos hidroelétricos e aqueles com base em fonte solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, cuja potência injetada nos sistemas de transmissão e distribuição seja menor ou igual a 30.000 KW, e atualizações.
- **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482^[11], ANEEL, DE 17 DE ABRIL DE 2012** Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica, e atualizações.
- **CONVÊNIO CONFAZ ICMS 16/2015, ANEEL, PUBLICADO EM 22 DE ABRIL DE 2015** Autoriza os Estados a concederem isenção de ICMS sobre uma parcela de energia total, a Tarifa de Energia (TE), da energia injetada na rede da concessionária e depois compensada, oriunda da própria unidade consumidora ou de outra unidade consumidora do mesmo titular, com o mesmo CPF ou CNPJ, por usinas instaladas com potência até 1MWp.
- **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 687/2015, ANEEL, DE 24 DE NOVEMBRO DE 2015, E ATUALIZAÇÕES** Altera a Resolução Normativa nº 482,

de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição (Prodist). Como destaques, estão as seguintes mudanças:

- Ampliação das fontes que podem ser utilizadas (quaisquer fontes renováveis de energia elétrica ou cogeração qualificada);
 - Ampliação do limite da central geradora de 1 MW para 3 MW para fontes hídricas e 5 MW para cogeração qualificada ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica;
 - Aumento do prazo de validade dos créditos de 36 para 60 meses;
 - Possibilidade de instalação de geração em condomínios;
 - Possibilidade de diversos consumidores se unirem, por meio de consórcio ou cooperativa, para implantar uma geração compartilhada;
 - A Aneel irá revisar novamente a Resolução Normativa nº 482/12 até 31 de dezembro de 2019, após acompanhar o desenvolvimento do mercado de micro e minigeração.
- **AUDIÊNCIA PÚBLICA Nº 1/2019** A Aneel, em 07/11/2019, realizou uma audiência pública para debater com a sociedade a proposta de revisão da Resolução Normativa 482/2012. Essa revisão da norma em 2019 foi prevista em 2015, quando da publicação da Resolução 687/2015, que alterou a Resolução 482.
- Consulta Pública – Referente ao tema da audiência pública, a consulta pública foi iniciada no dia 17/10/2019 e recebeu contribuições até o dia 30/11/2019.
- **LEI Nº 14.300, DE 6 DE JANEIRO DE 2022**, e regulamentações – Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída,

o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis nº 10.848, de 15 de março de 2004, e nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências.

PLANOS E AÇÕES FEDERAIS SIMULTÂNEOS ÀS RESOLUÇÕES

→ **PLANO BRASIL MAIOR** O Governo Federal lançou, em agosto de 2011, o Plano Brasil Maior visando orientar políticas de desenvolvimento industrial que melhorem as condições competitivas do País. Nesse plano, a dimensão estruturante das diretrizes setoriais contempla a Cadeia de Suprimentos em Energia, a qual prevê o desenvolvimento de fontes renováveis, abrangendo a energia eólica e solar.

Em 2013, foi lançado o documento **Agendas Estratégicas Setoriais** ^[24], parte do programa Brasil Maior, tendo como um dos objetivos ampliar o uso da mini e microgeração distribuída. Assim, estão previstas algumas medidas, tais como:

- Dar publicidade aos produtos/ instrumentos de crédito para aquisição e instalação de equipamento para uso em geração distribuída;
- Criar linhas de crédito **do Banco do Brasil e da Caixa Econômica Federal** para o financiamento de equipamentos e serviços em energia distribuída.

O Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (**BNDES**) se destaca como um potencial financiador de projetos em energia renovável. Utiliza incentivos que se aplicam em particular à energia solar, como apresentados a seguir.

→ **FUNDO CLIMA** ^[25] Programa do Ministério do Meio Ambiente (MMA), contempla, entre os diversos objetivos, o apoio aos investimentos em geração de energia a partir da captura da radiação solar, bem como o desenvolvimento tecnológico e a cadeia produtiva do setor.

Os clientes do Fundo Clima são: Estados, Municípios e Distrito Federal; entidades da Administração Pública Indireta Federal, Estadual

e Municipal, inclusive consórcios públicos que tenham a natureza de associação pública; empresas com sede e administração no País; produtores rurais (pessoas físicas ou jurídicas) e suas cooperativas.

→ **FUNDO TECNOLÓGICO (BNDES FUNTEC)** ^[25]

Destina-se a apoiar financeiramente projetos que objetivam estimular o desenvolvimento tecnológico e a inovação de interesse estratégico para o País, em vários setores, inclusive energia solar (desenvolvimento de tecnologias para geração heliotérmica ou fotovoltaica, inclusive novas tecnologias para purificação de silício). Serão contemplados com os recursos do BNDES Funtec as Instituições Tecnológicas (IT) e as Instituições de Apoio (IA) para o desenvolvimento de projetos de pesquisa aplicada, desenvolvimento tecnológico e inovação, com a interveniência, na operação de financiamento, de empresas participantes que exerçam atividade econômica diretamente ligada ao escopo do projeto.

Também poderão ser apoiados com recursos do BNDES Funtec projetos selecionados pelo **Plano Inova Energia** ^[25]. Este plano é uma iniciativa destinada à coordenação das ações de fomento à inovação e ao aprimoramento da integração dos instrumentos de apoio disponibilizados pelo BNDES, pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) e pela Financiadora de Estudos e Projetos (Finep). Uma das finalidades é apoiar as empresas brasileiras no desenvolvimento e domínio tecnológico das cadeias produtivas de energia solar: fotovoltaica e termossolar para geração de energia elétrica.

O BNDES possui também o Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (**Pronaf Eco**) ^[25], o qual, entre outros objetivos, apoia financeiramente investimento de implantação, utilização e/ou recuperação de tecnologias de energia renovável, como exemplo, a energia solar. Os clientes que podem aderir ao programa são pessoas físicas enquadradas como agricultores familiares do Pronaf. O Banco de Desenvolvimento do Espírito Santo (Bandes) ^[27] possui um programa semelhante.

O BNDES oferece ainda o **Cartão BNDES**^[26], um produto que, baseado no conceito de cartão de crédito, visa financiar os investimentos das micro, pequenas e médias empresas.

O portador do Cartão BNDES poderá efetuar sua compra exclusivamente no âmbito do Portal de Operações do BNDES (www.cartaobndes.gov.br), procurando os produtos que lhe interessam e seguindo os passos indicados para a compra. As principais vantagens são: crédito pré-aprovado, financiamento automático em até 48 meses, prestações fixas e iguais, e taxa de juros atrativa.

→ **FUNDO SOLAR**^[28] É uma iniciativa do Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina (Instituto Ideal) em parceria com o Grüner Strom Label (Selo de Eletricidade Verde da Alemanha, associação alemã de organizações sem fins lucrativos, criada para gerenciar um

selo de certificação de eletricidade verde na Alemanha). Tem como objetivo incentivar o desenvolvimento do mercado fotovoltaico no Brasil e apoiar os primeiros projetos de microgeração conectados à rede.

Qualquer pessoa física ou jurídica interessada em instalar uma microunidade fotovoltaica de potência até 5 kWp conectada à rede e integrada a uma edificação poderá solicitar o apoio a esse fundo. O valor do aporte, com montante não-reembolsável, é exclusivo para gastos com custeio, tais como despesas com pessoal, consultorias, treinamento, serviços de terceiros. Demais despesas correntes serão determinadas dependendo da localização onde a microunidade é instalada e do custo total do investimento, pois são levados em conta, no cálculo, o valor oficial da tarifa de eletricidade vigente paga pelo solicitante à concessionária e o nível da radiação solar da localidade.

8.2 Mecanismos de incentivos estaduais

Cada Estado fez ao seu próprio modo as políticas de incentivo à micro e à minigeração distribuída e centralizada, em particular para a fonte solar térmica e fotovoltaica (FV).

O destaque se dá ao fato de todos os Estados e o Distrito Federal, entre 2015 e 2019, terem elaborado suas leis e decretos se enquadrando ao Convênio Confaz ICMS 16/2015.

8.3 Mecanismos de incentivo pelo Estado do Espírito Santo

O Governo do Estado do Espírito Santo elaborou estudos, instituiu decretos e outras ações em prol da energia solar capixaba. A seguir, são abordados os principais.

→ **DECRETO 1.090-R**, de 22 de outubro de 2002, com vigência até 2021 – Aprova o Regulamento do Imposto sobre Operações Relativas à Circulação de Mercadorias e sobre Prestações de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação (**RICMS/ES**) que consolida e atualiza a legislação do imposto e dá outras providências. Determina a isenção de ICMS

no Estado do Espírito Santo para alguns componentes de um sistema solar.

De acordo com o artigo 5º, inciso LXXX, do **RICMS-ES**^[22], ficam isentas do imposto as operações com os produtos a seguir, desde que estejam beneficiados com isenção ou alíquota zero do IPI ^[29]:

- bombas para líquidos, para uso em sistema de energia solar fotovoltaico em corrente contínua, com potência não superior a 2 HP;
- aquecedores solares de água;
- geradores fotovoltaicos;

- células solares não montadas;
 - células solares em módulos ou painéis;
 - aerogeradores de energia eólica.
- **LIVRO “A ENERGIA SOLAR NO ESPÍRITO SANTO – TECNOLOGIAS, APLICAÇÕES E OPORTUNIDADES”, 2013, 1ª EDIÇÃO** Estudo elaborado pela ARSP e pelo Incaper que apresenta o potencial solar natural estadual em mapas e a diversidade de produtos e formas de negócios possíveis de se realizar com o uso das fontes renováveis, mais especificamente a solar.
- **LEI Nº 10.807**, publicada em 20 de fevereiro de 2018 – Formalizou a adesão do Estado do Espírito Santo ao Convênio Confaz ICMS 15/2016, isentando a parte da Tarifa de Energia (TE) da conta de energia compensada.
- **DECRETO 4519-OR, DE 14 DE OUTUBRO DE 2019** Uma ação do Governo do Estado que instituiu a obrigatoriedade da instalação de equipamentos para captação de energia solar nas novas edificações estaduais. Foi assinado durante o XI Fórum Capixaba de Energia (Fenergia), realizado em Vitória (ES) em 14 de outubro de 2019.
- **PROPOSTA DE POLÍTICAS PÚBLICAS E PRIVADAS PARA MELHOR INSERÇÃO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NA MATRIZ DO ES, 2019** Estudo pela ARSP que destacou a Energia Solar, principalmente a fotovoltaica (FV), entre as fontes renováveis, com os seus benefícios. Trouxe a legislação em Geração Distribuída (GD), o número de usinas FV e a potência instalada no Estado em relação às demais Unidades da Federação. Também apresentou análises de receita e renúncia com a isenção do ICMS sobre a energia vinda da GD e propostas de políticas públicas e privadas a serem desenvolvidas no Espírito Santo.
- **PROPOSTAS DE POLÍTICAS PÚBLICAS E PRIVADAS EM MOBILIDADE ELÉTRICA NO ESPÍRITO SANTO PARA AUTOMÓVEIS E ÔNIBUS URBANOS ELÉTRICOS** Neste estudo, estimulase a integração entre mobilidade elétrica e o uso de fontes renováveis e eficiência energética no Estado. Inclui análise dos

programas de fomento oferecidos pelos bancos do Estado (Banestes e Bandes).

POLÍTICAS DE FOMENTO DO BANESTES – CRÉDITO VERDE

O Banestes instituiu o **Crédito Verde**, que tem como intuito estimular investimentos em empresas e residências na utilização de fontes renováveis de energia para aquisição de sistemas de geração de energia solar, eólica e aquecedores solares, além da aquisição de carros novos e usados que contenham sistema de Gás Natural Veicular (GNV), bem como o financiamento do kit-gás para GNV.

Assim, contribui para o desenvolvimento sustentável e responsável dos clientes, proporcionando economia por meio do aumento de produtividade e redução do consumo de energia.

Linhas disponíveis: Crédito Energia Limpa, Crédito GNV, Microcrédito Energia Limpa e BNDES Finame – Energia Renovável.

POLÍTICAS DE FOMENTO DO BANDES – ECONOMIA VERDE

A ideia central da **Economia Verde** é que os processos produtivos da sociedade e as suas transações econômicas contribuam para o desenvolvimento sustentável. Os projetos de investimento devem promover o estímulo à geração e ao uso de energias renováveis e alternativas, bem como o uso eficiente dos recursos, com incentivo à reciclagem e à adequação ambiental na busca pela eficiência energética.

PRINCIPAIS OBJETIVOS DA ECONOMIA VERDE:

- Melhoria dos processos produtivos;
- Aumento da eficiência com diminuição no uso dos recursos naturais;
- Diminuição das emissões de gases do efeito estufa;
- Transformação de resíduos de um processo em insumos de outros;
- Proteção dos mananciais, uso responsável da água, universalização do saneamento básico;
- Ampliação de fontes de energia limpas e renováveis;

- Recuperação e preservação dos ecossistemas;
- Atenuação dos efeitos da mudança do clima.

O Bandes trabalha ativamente na mobilização dos empreendedores e possui uma linha de financiamento para a economia verde, além de dispor de fundos para projetos específicos.

CONDIÇÕES DE FINANCIAMENTO:

Valor financiado: até R\$ 5.000.000,00 (cinco milhões de reais). Participação: até 100%. Prazo: até 96 meses. Carência: até 36 meses. Taxa de juros: 6,75% + Selic ao ano para operações com risco AA, A ou B e 8,75% + Selic ao ano para operações risco C.

Para saber mais sobre financiamento, basta entrar em contato com um consultor credenciado do Bandes na sua região.

→ **DECRETO Nº 4.663-R, DE 02 DE JUNHO DE 2020**

Declara de utilidade pública, nos termos do disposto na alínea “b” do inciso VII do art. 3º da Lei Federal nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006, os empreendimentos voltados à geração de energia elétrica de pequeno porte, bem como as obras de infraestrutura necessárias para suas instalações, destinadas ao serviço público de energia, nos municípios que atendem.

→ **PORTARIA Nº 472-S, DE 30 DE SETEMBRO 2020**

Institui o **Grupo de Trabalho (GT)** para tratar da autonomia energética do Governo

do Espírito Santo por meio de usinas fotovoltaicas. Foram designados servidores da Sedu, ARSP, Seger, Sefaz, Sejus, Sesa, PGE e Seag. Reconstituído, como **Comissão Técnica (CT) pela Portaria nº 367_S**. Objetivo: acompanhamento do processo de estruturação do projeto de construção, operacionalização, manutenção e gestão de miniusinas solares para atendimento da demanda de energia elétrica da Administração Pública Direta do Estado do Espírito Santo. Apreciar os estudos apresentados e remeter a avaliação à autoridade competente na Seger. Consulta Pública Seger nº 001/2022 – TR Miniusinas FV. Período: de 26/05 a 30/06/2022.

→ **LEI Nº 11.253, DE 08 DE ABRIL DE 2021** Institui o Programa de Geração de Energias Renováveis do Espírito Santo (Gerar).

→ **DECRETO Nº 4896-R, DE 02 DE JUNHO DE 2021**

Regulamenta a Lei nº 11.253, de 8 de abril de 2021, que dispõe sobre a Política Estadual de Incentivo à Geração de Energias Renováveis (Gerar), e dá outras providências.

→ **DECRETO Nº 5.416-R, PUBLICADO NO DIO/ES EM 29 DE JUNHO DE 2023**

Institui o Programa de Geração de Energias Renováveis da Cadeia do Hidrogênio Sustentável – Programa Gerar Hidrogênio.



CAPÍTULO

9.

Mapas
Solarimétricos do
Espírito Santo

9.1 Metodologia

Os mapas solarimétricos do Estado do Espírito Santo têm as mesmas bases de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar, Edição de 2017, e encontram-se disponíveis em http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html. A seguir, é apresentado o desenvolvimento da metodologia do chamado **modelo BRASIL-SR**.

O BRASIL-SR^[77] é um modelo físico para obtenção de estimativas da **radiação solar incidente na superfície**, que combina a aproximação de “dois-fluxos” (Meador e Weaver, 1980) na solução da equação de transferência radiativa com o uso de parâmetros determinados de forma estatística a partir de imagens de satélite. Foi inicialmente desenvolvido na Alemanha (Stuhlmann *et al.*, 1990) e, posteriormente, adaptado e aperfeiçoado no Brasil por meio de convênio estabelecido entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe) e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) (Pereira *et al.*, 1996). A cobertura de nuvens é considerada o principal fator de modulação da transmitância atmosférica, e as demais propriedades óticas são parametrizadas a partir das variáveis meteorológicas de temperatura na superfície, umidade relativa do ar, visibilidade atmosférica e albedo de superfície. A obtenção de uma estimativa da radiação solar incidente na superfície pode ser dividida em três etapas:

1. tratamento dos dados meteorológicos e imagens de satélite;
2. aplicação do método de transferência radiativa de “dois-fluxos”;
3. cálculo das componentes da irradiação solar incidente na superfície em Wh/m^2 : irradiação global horizontal (H), irradiação direta normal (H_n), irradiação difusa horizontal (H_{dif}) e irradiação global no plano inclinado (H_i).

As imagens de satélite utilizadas no BRASIL-SR foram coletadas em resoluções espaciais e temporais distintas, dependendo do satélite utilizado. Entre 1999 e 2003, a resolução temporal era de três horas. Entre 2003 e 2008, passou a ser de 30 minutos, sendo depois reduzida para 15 minutos e permanecendo assim até 2013. De 2013 em diante, a resolução temporal voltou a ser de 30 minutos. A resolução espacial das imagens apresentadas nas imagens dos satélites é de $0,03^\circ$ em longitude e $0,05^\circ$ em latitude, o que corresponde aproximadamente a **3 km x 5 km** no ponto em-nadir do satélite (é o ponto que o satélite está olhando diretamente, perpendicularmente, para o chão). Imagens coletadas antes de 2003 possuíam uma resolução espacial de $0,125^\circ$ em longitude e $0,155^\circ$ em latitude, cerca de **12,5 km x 15,5 km**.

9.1.1 Validação das estimativas do modelo BRASIL-SR

Para a validação das estimativas produzidas pelo modelo BRASIL-SR, foram utilizados dados observados nas estações solarimétricas da Rede Sonda, em estações privadas e nas estações meteorológicas automáticas operadas pelo INMET. A base de dados observados utilizada no procedimento de validação compreende o período de 2005 a 2015, totalizando 503 estações de superfície, selecionadas a partir das 900 existentes, com qualidade adequada para participar na validação das estimativas fornecidas pelo modelo BRASIL-SR.

Todo o processo de validação foi realizado por meio de comparação dos valores diários estimados e observados da irradiação global horizontal (H) e suas componentes direta normal

(H_n) e difusa (H_{dif}) em Wh/m^2 .

A seguir, são apresentados os gráficos de dispersão entre valores observados e modelados para as médias mensais dos totais diários de irradiação global horizontal e os histogramas dos desvios aferidos e probabilidades acumuladas para cada uma das regiões brasileiras, e um resumo na tabela.

Na tabela e nos gráficos, é possível se confirmar o quão próximos são esses dois conjuntos de valores.

Pode-se notar o bom desempenho do modelo, atingindo coeficientes de correlação (r) na faixa de 0,81 a 0,98 e raiz do erro quadrático médio (REQM) entre 395 e 467 Wh/m^2 . Essas métricas

estão associadas à dispersão dos pontos em torno da diagonal central (estimativa ideal) e dizem respeito à capacidade do modelo em estimar o total

diário de irradiação em um mês específico para um ponto pertencente a determinada região ao longo dos 17 anos analisados.

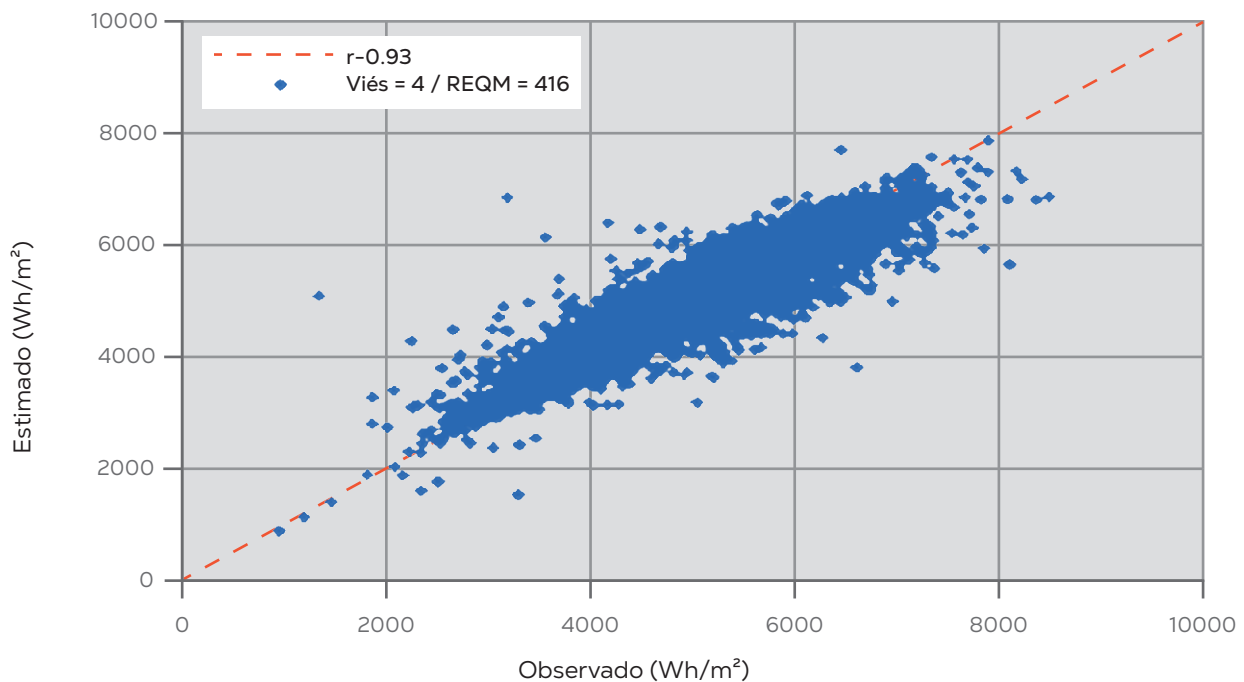
TABELA 9.1 Métricas de validação das médias mensais dos totais diários de irradiação global horizontal para cada região brasileira

REGIÃO	R	VIÉS (Wh/m ²)	VIÉS (%)	REQM (Wh/m ²)	REQM (%)	IRRADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL MÉDIA OBSERVADA (Wh/m ²)
Norte	0,81	30	0,6%	467	9,7%	4825
Nordeste	0,87	12	0,2%	456	8,3%	5483
Centro-Oeste	0,86	23	0,5%	421	8,3%	5082
Sudeste	0,91	4	0,1%	416	8,4%	4951
Sul	0,98	-4	-0,1%	395	8,9%	4444
Médio	0,89	12	0,2%	421	8,2%	5153

Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2017.

NOTAS: *r* é o coeficiente de correlação. REQM, a raiz do erro quadrático médio, em Wh/m².

GRÁFICO 9.1 Dispersão entre os valores observados e modelados para as médias mensais do total diário de irradiação global horizontal para a Região Sudeste



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2017.

NOTA: Viés: valor esperado para o desvio na estimativa de irradiação solar.

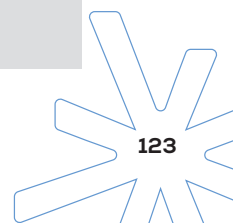
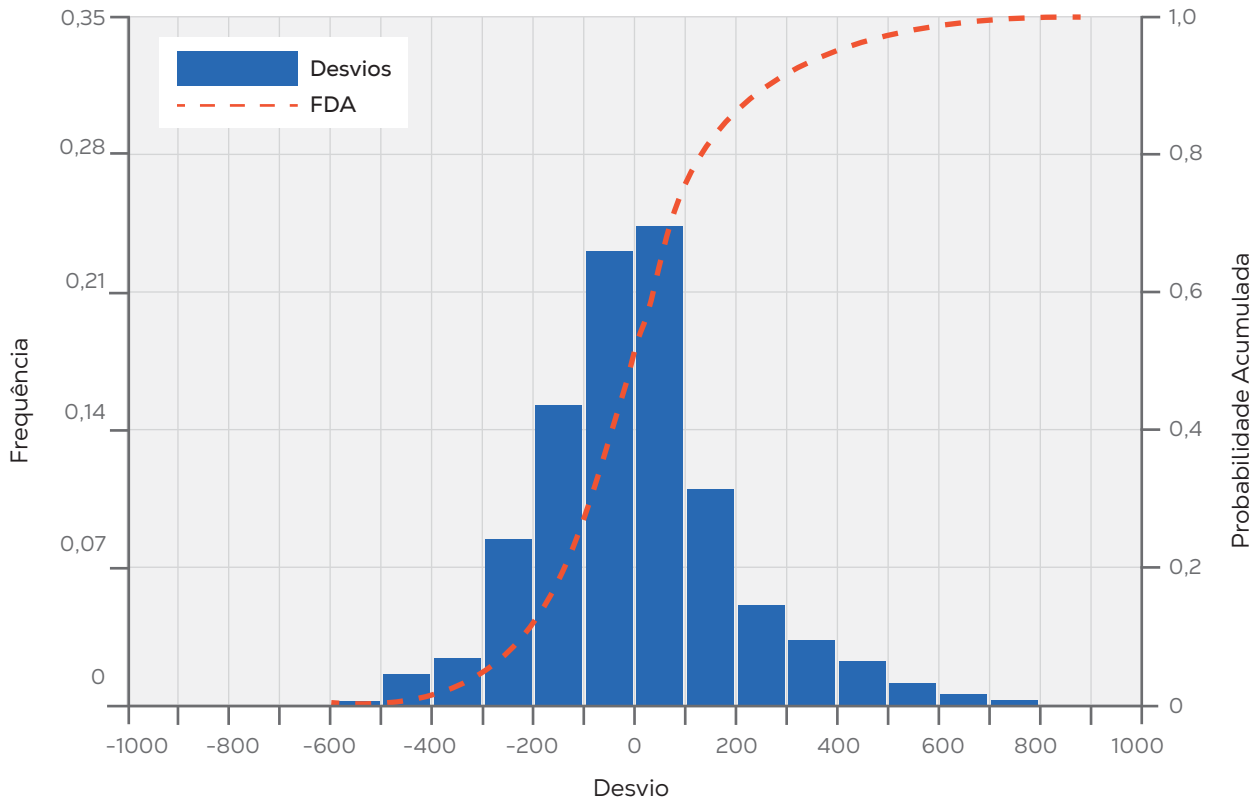


GRÁFICO 9.2 Histograma e função de probabilidade acumulada para cada intervalo de desvio do modelo em relação à média observada para a Região Sudeste



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2017. Nota: FDA - Função de Distribuição Acumulada.

O **viés** deve ser entendido como o **valor esperado para o desvio na estimativa de irradiação solar** deste Atlas, ao se avaliar um ponto qualquer dentro de determinada região do Brasil. Aqui, na Região Sudeste, o Estado do Espírito Santo. No entanto, o histograma traz também a informação sobre a probabilidade de verificar um desvio mensal abaixo ou acima da média regional. De maneira geral, quanto mais estreita a pirâmide do histograma, menor o intervalo de desvios, portanto melhor o desempenho do modelo. A **Função de Distribuição Acumulada (FDA)** sobreposta ao histograma permite avaliar de forma objetiva a probabilidade

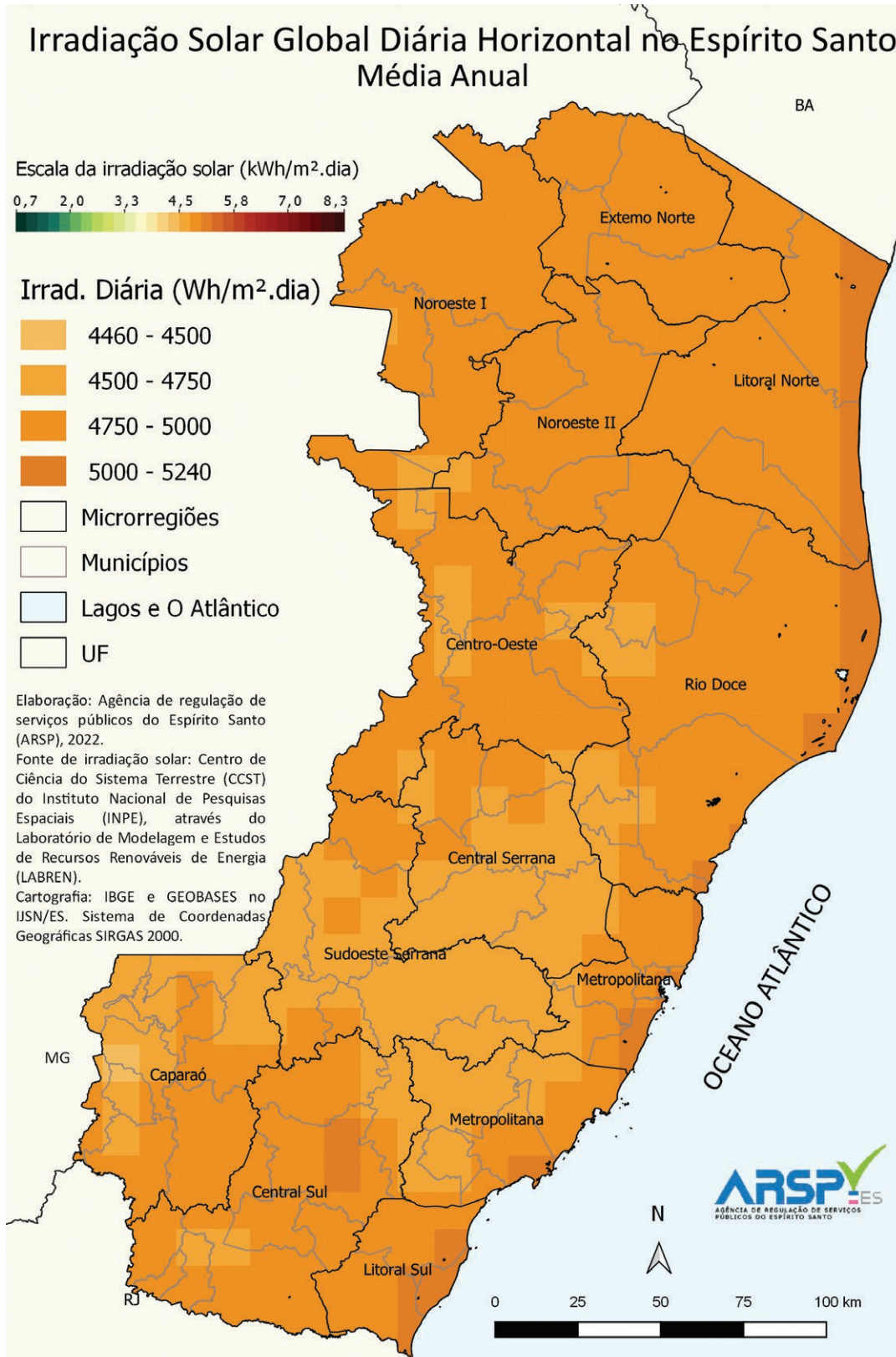
(ordenadas) de exceder qualquer um dos valores dos desvios (abscissas), sendo uma ferramenta útil aos usuários desta obra.

Concluídas as validações das informações do Atlas Brasileiro de Energia Solar 2017, a seguir estão apresentados os mapas para o Estado do Espírito Santo nas quatro classificações:

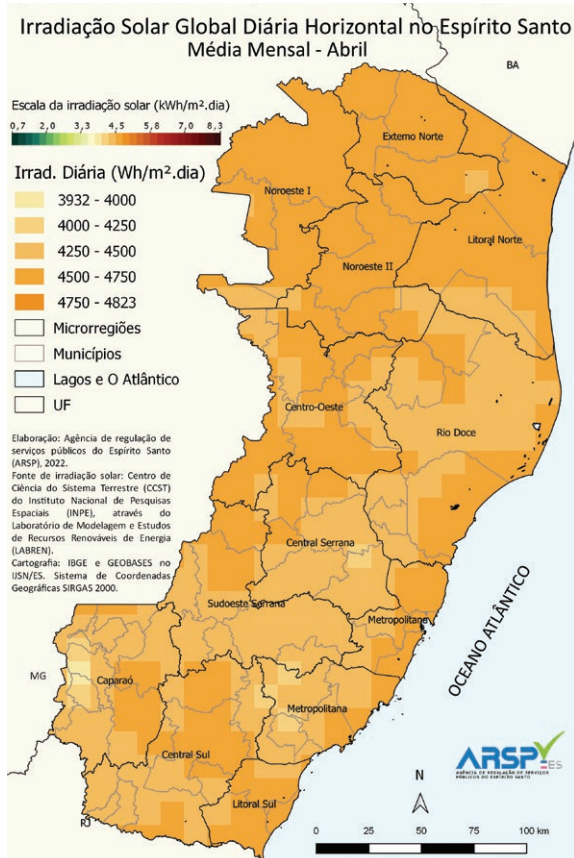
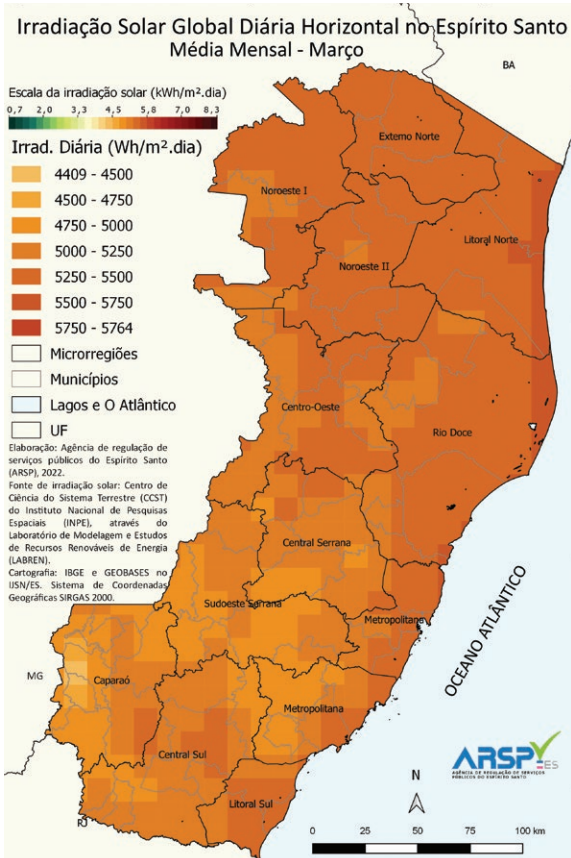
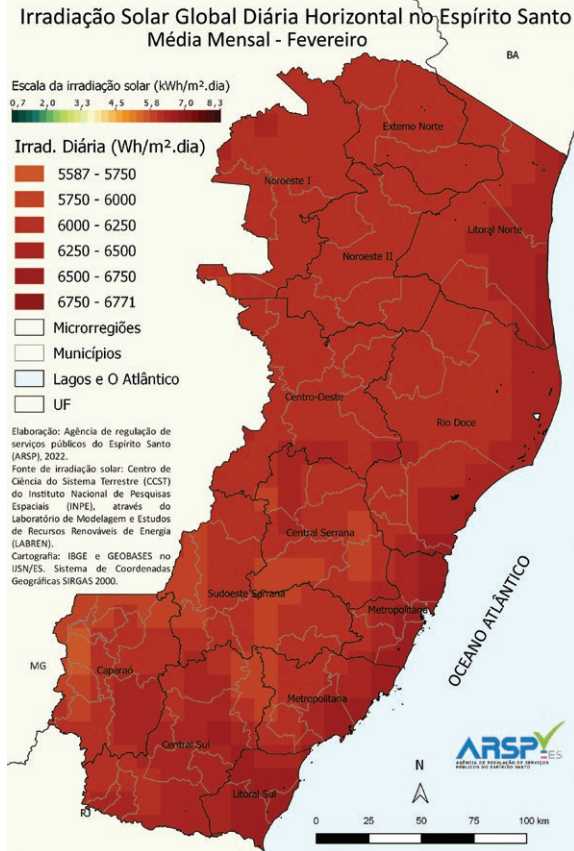
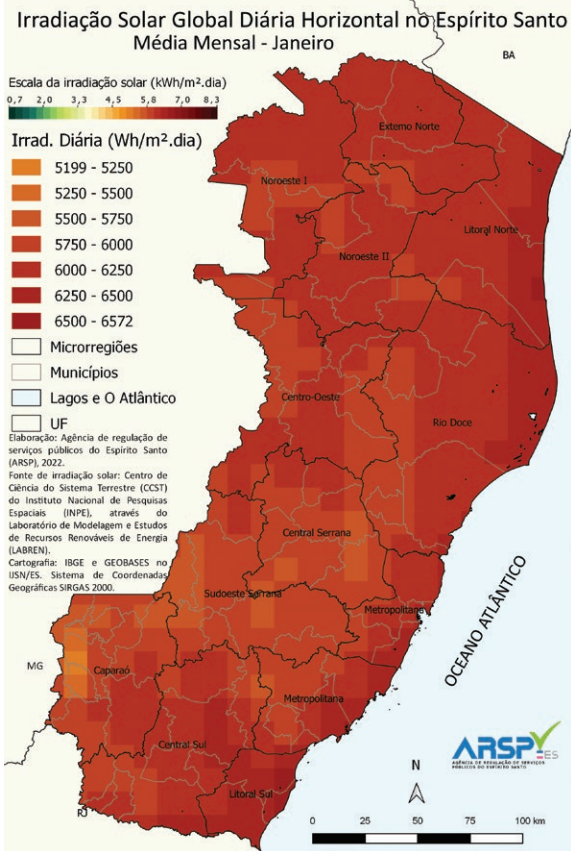
- Irradiação Global;
- Irradiação Inclinada;
- Irradiação Direta;
- Irradiação PAR (Photosynthetically Active Radiation – Irradiação fotossinteticamente ativa).

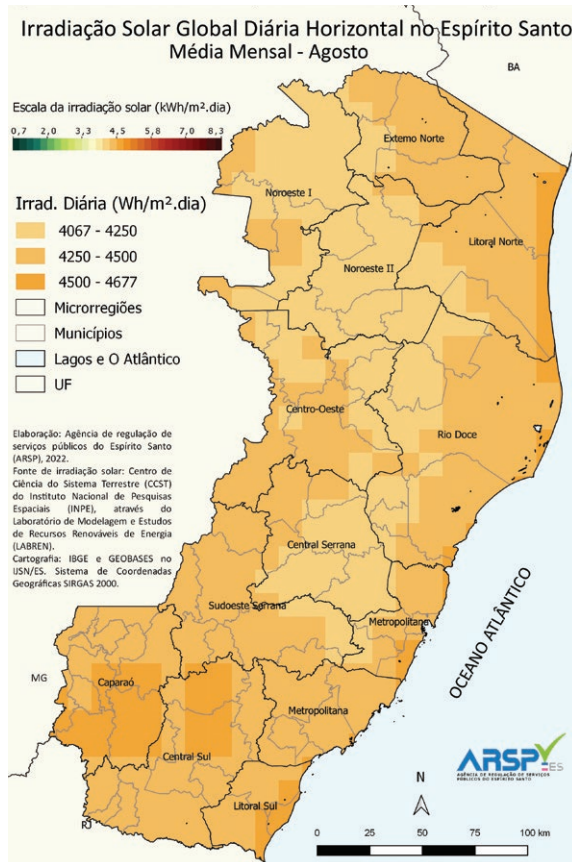
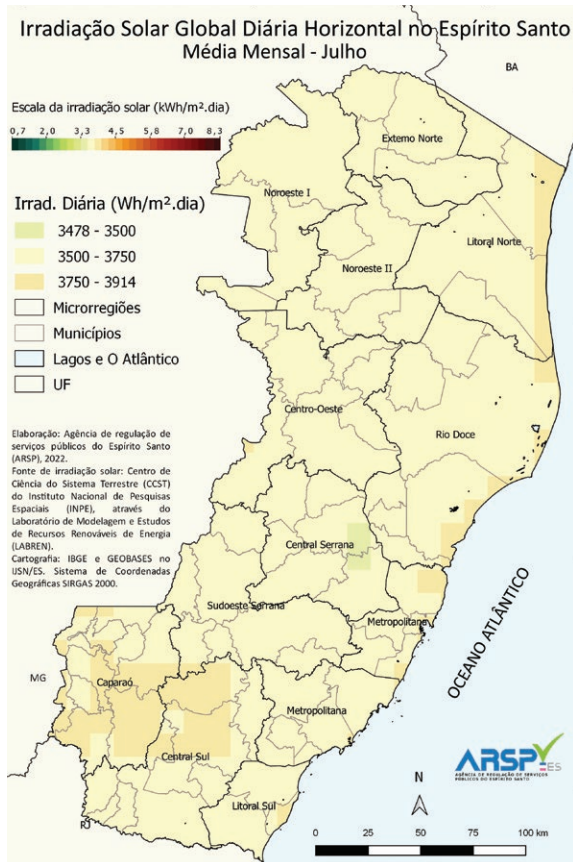
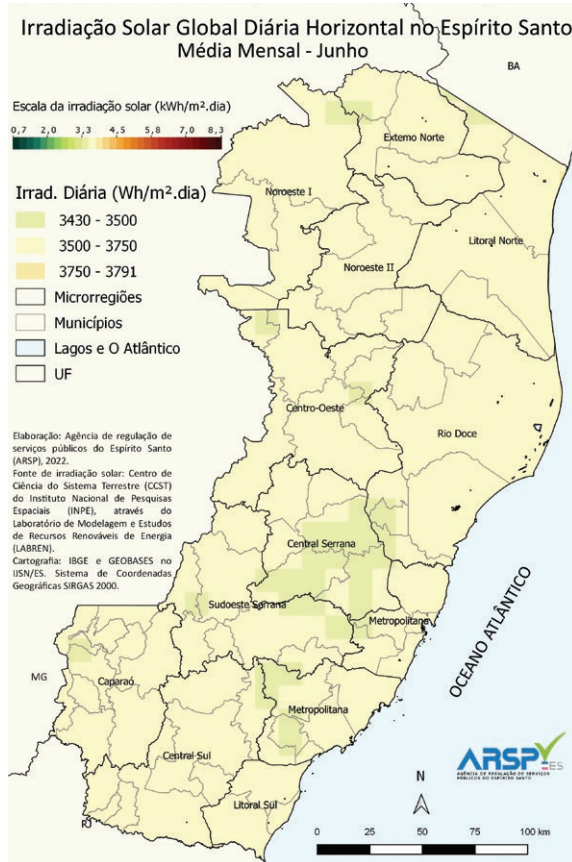
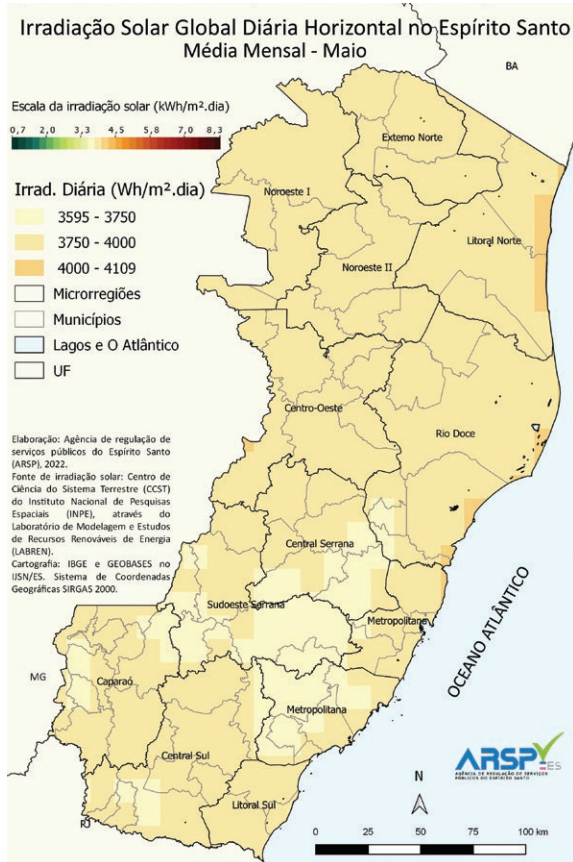
9.2 Mapas da irradiação solar global diária horizontal no ES (Wh/m².dia)

MAPA 9.1 Irradiação solar global diária, média anual, no Espírito Santo (Wh/m².dia)

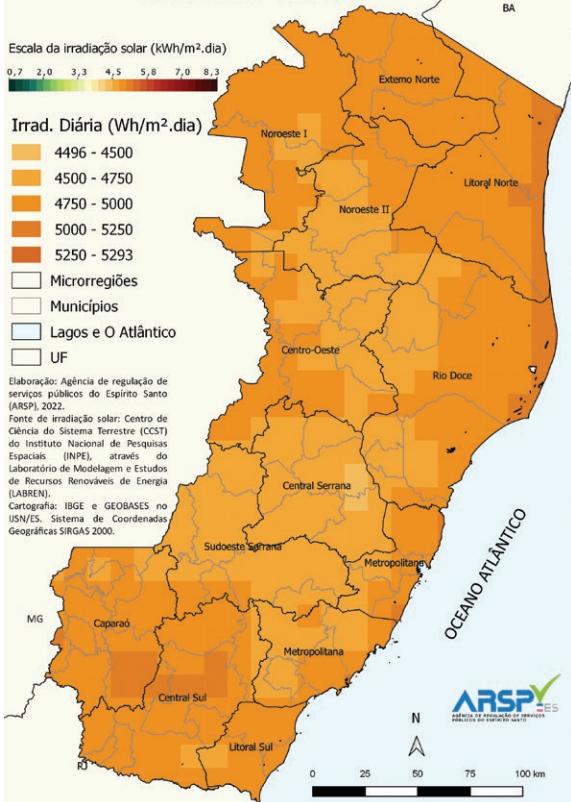


MAPA 9.2 Irradiação solar global diária, médias mensais, no Espírito Santo (Wh/m².dia)

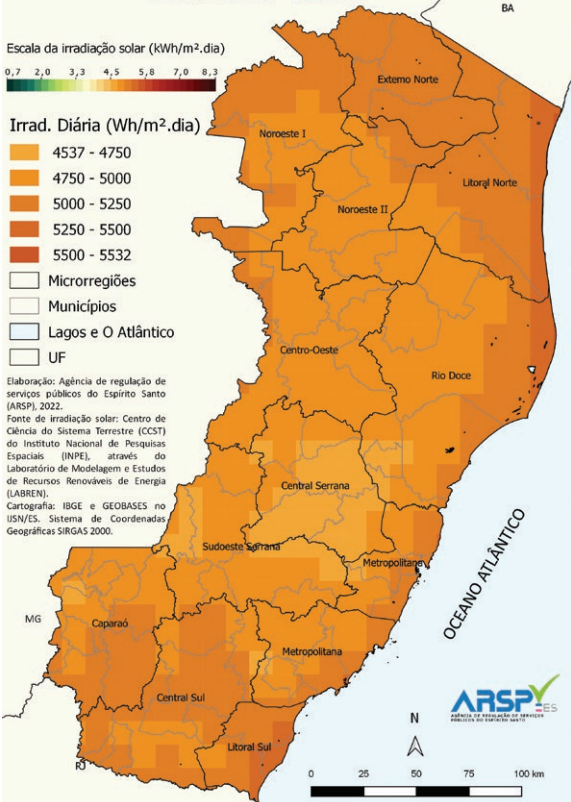




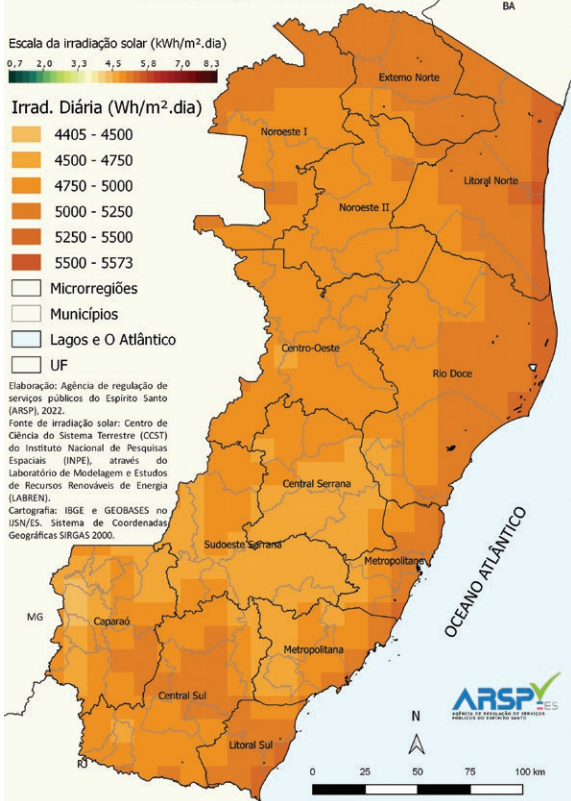
Irradiação Solar Global Diária Horizontal no Espírito Santo Média Mensal - Setembro



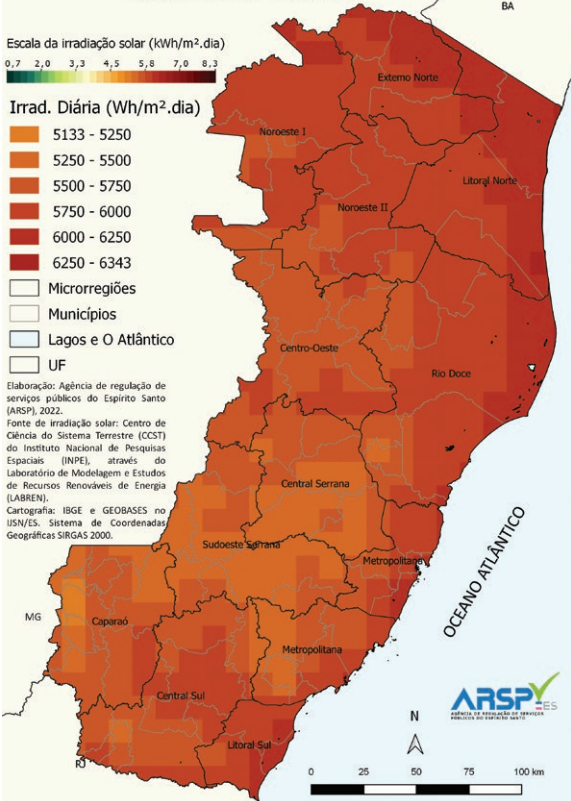
Irradiação Solar Global Diária Horizontal no Espírito Santo Média Mensal - Outubro



Irradiação Solar Global Diária Horizontal no Espírito Santo Média Mensal - Novembro



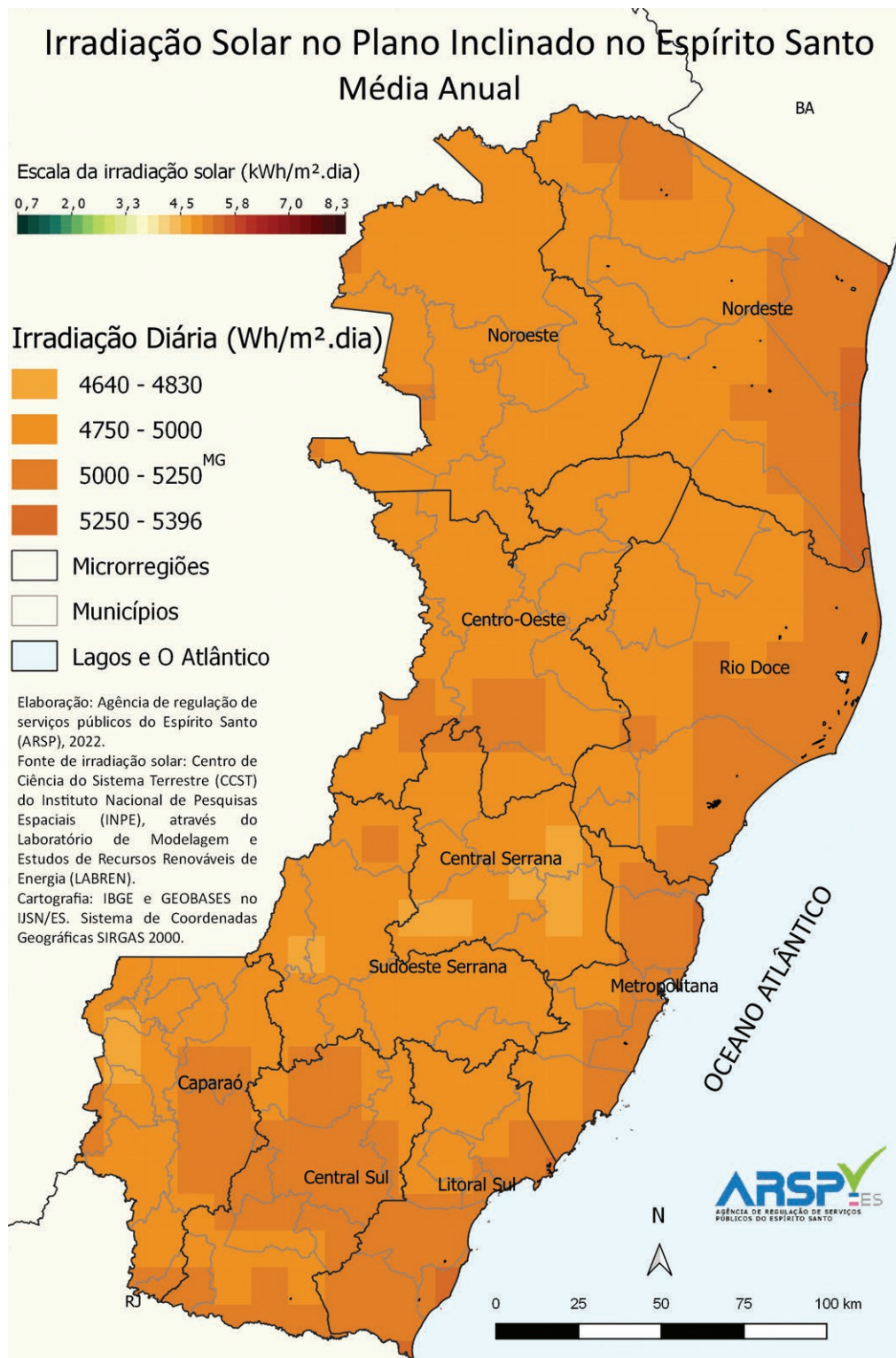
Irradiação Solar Global Diária Horizontal no Espírito Santo Média Mensal - Dezembro



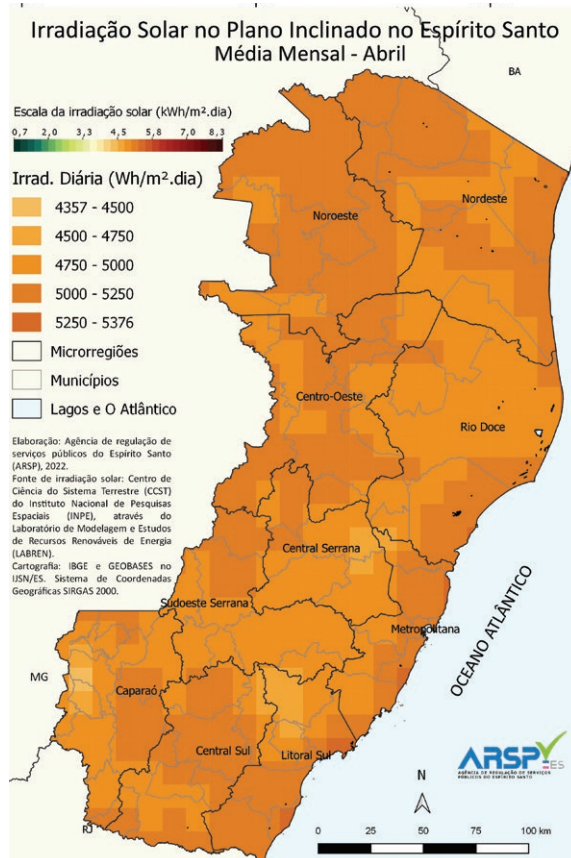
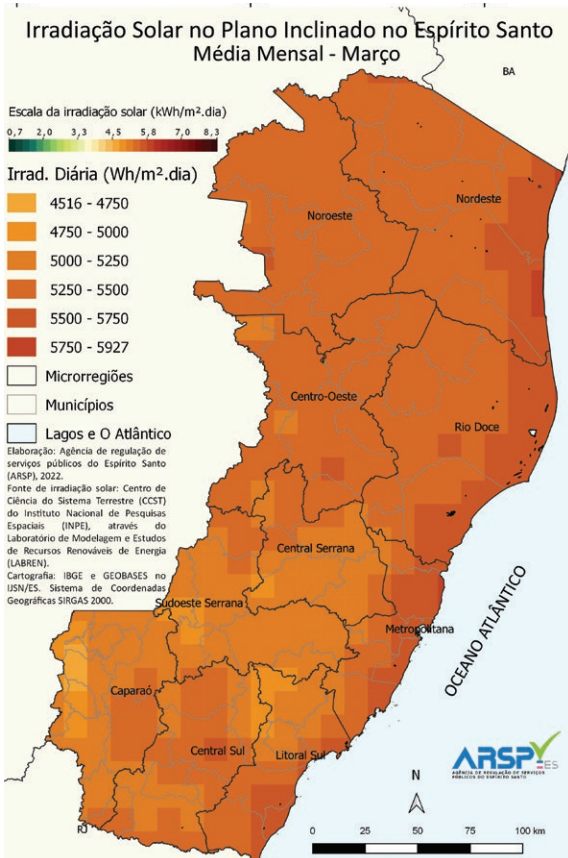
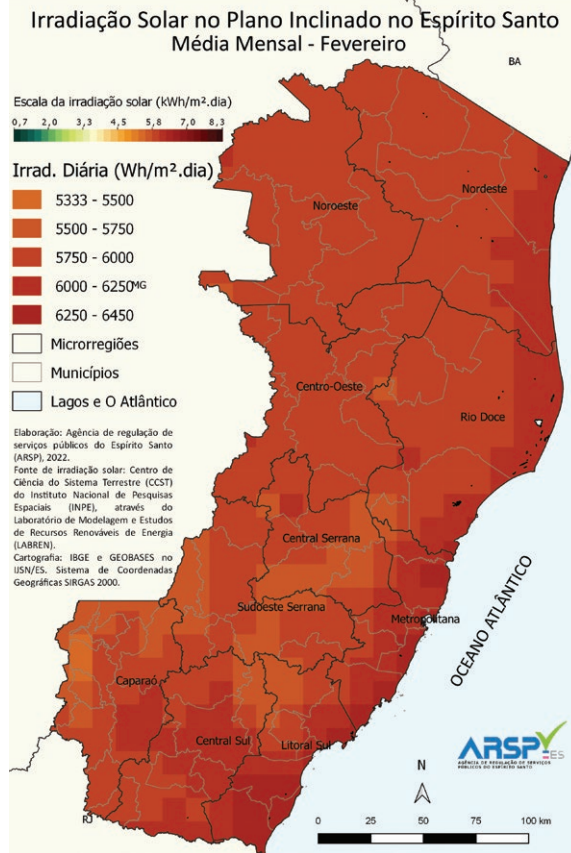
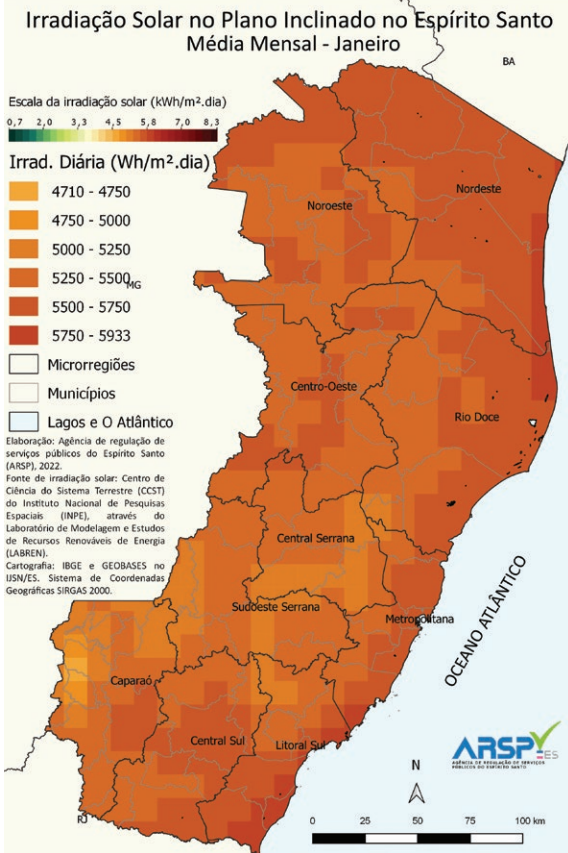
9.3 Mapas da irradiação solar no plano inclinado no Espírito Santo (Wh/m².dia)

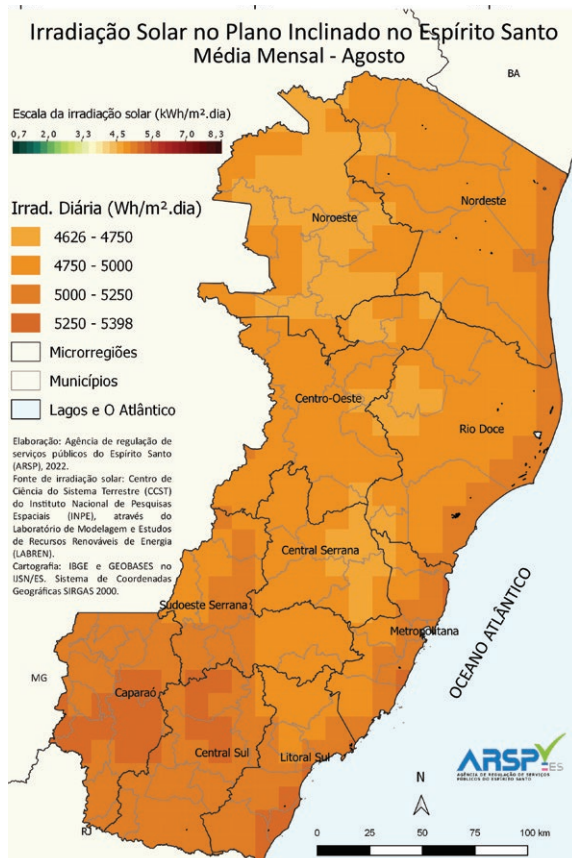
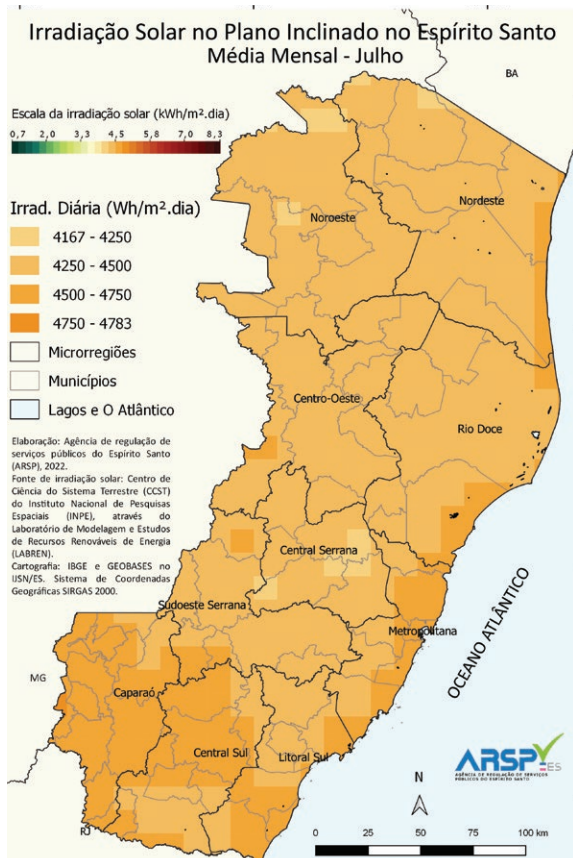
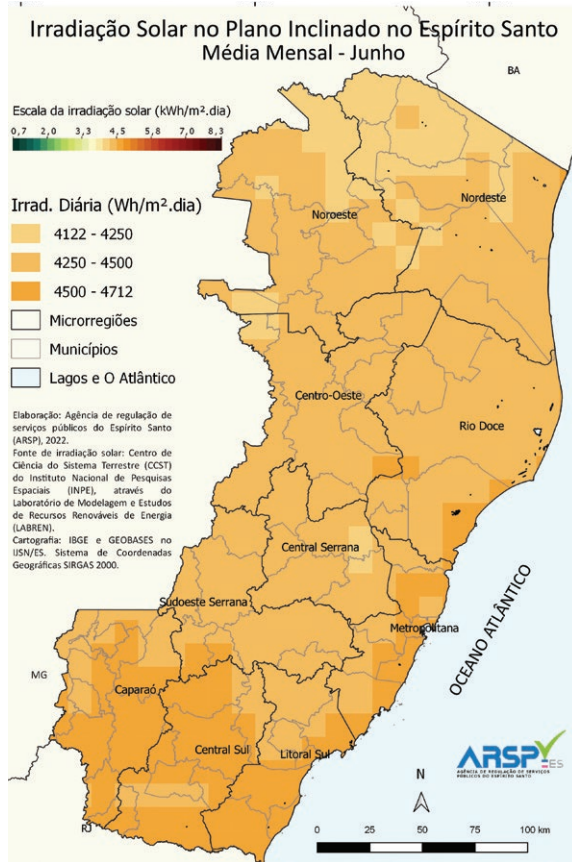
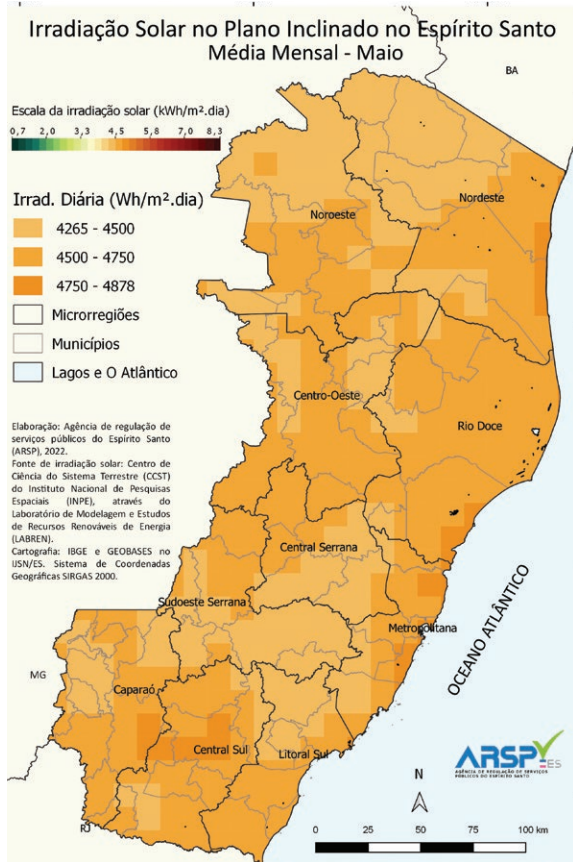
O mapa de irradiação solar diária, no plano inclinado, média anual, no Espírito Santo, foi usado anteriormente com a infraestrutura energética no Estado.

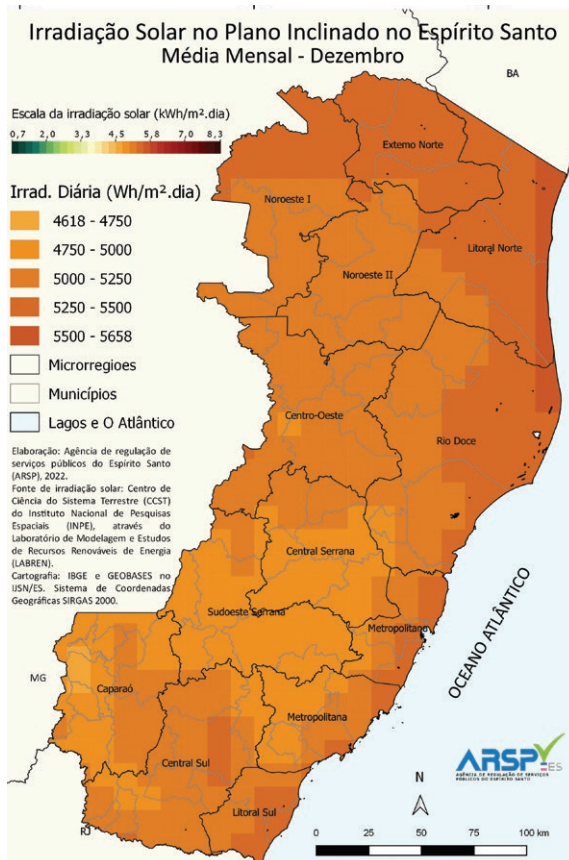
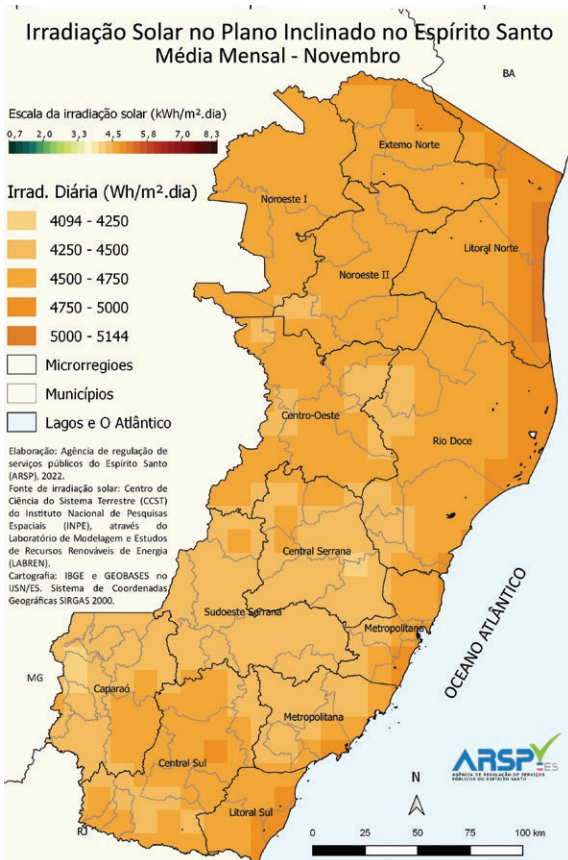
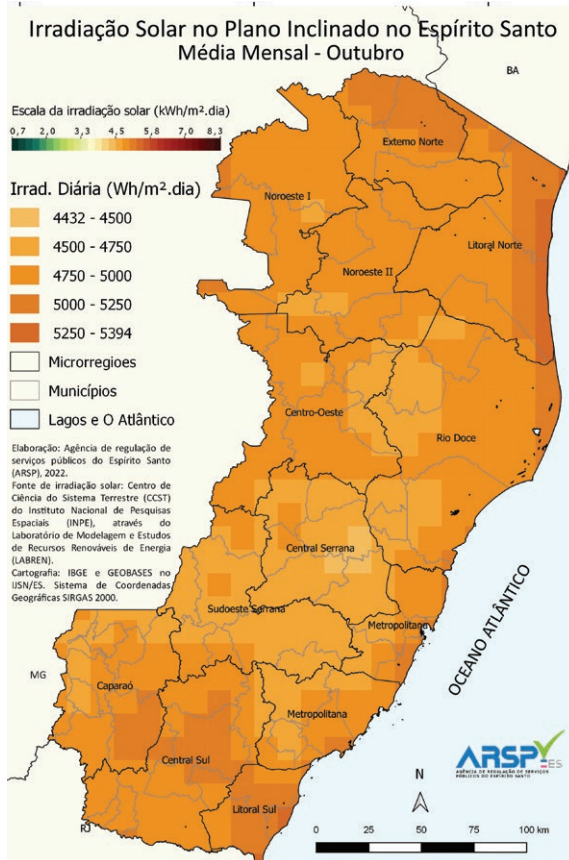
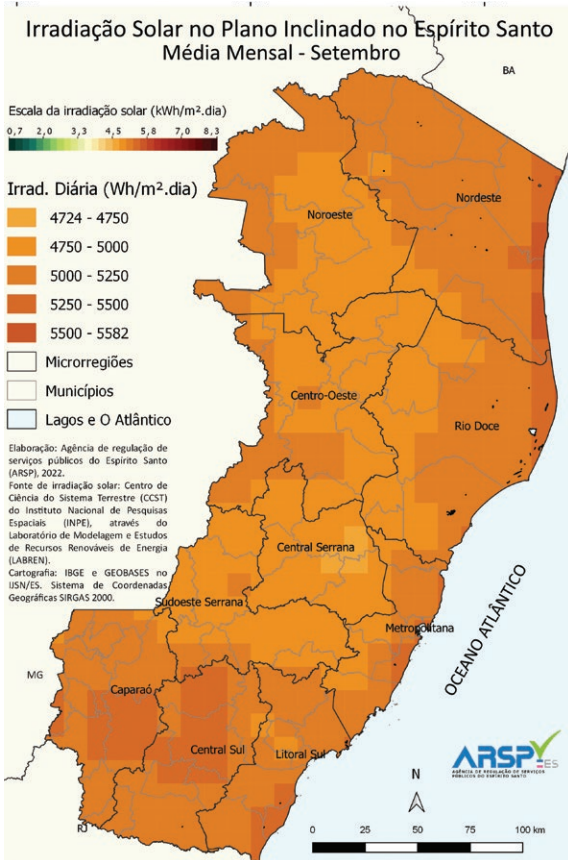
MAPA 9.3 Irradiação solar diária, no plano inclinado, média anual, no Espírito Santo (Wh/m².dia)



MAPA 9.4 Irradiação solar diária, no plano inclinado, médias mensais, no ES (Wh/m².dia)

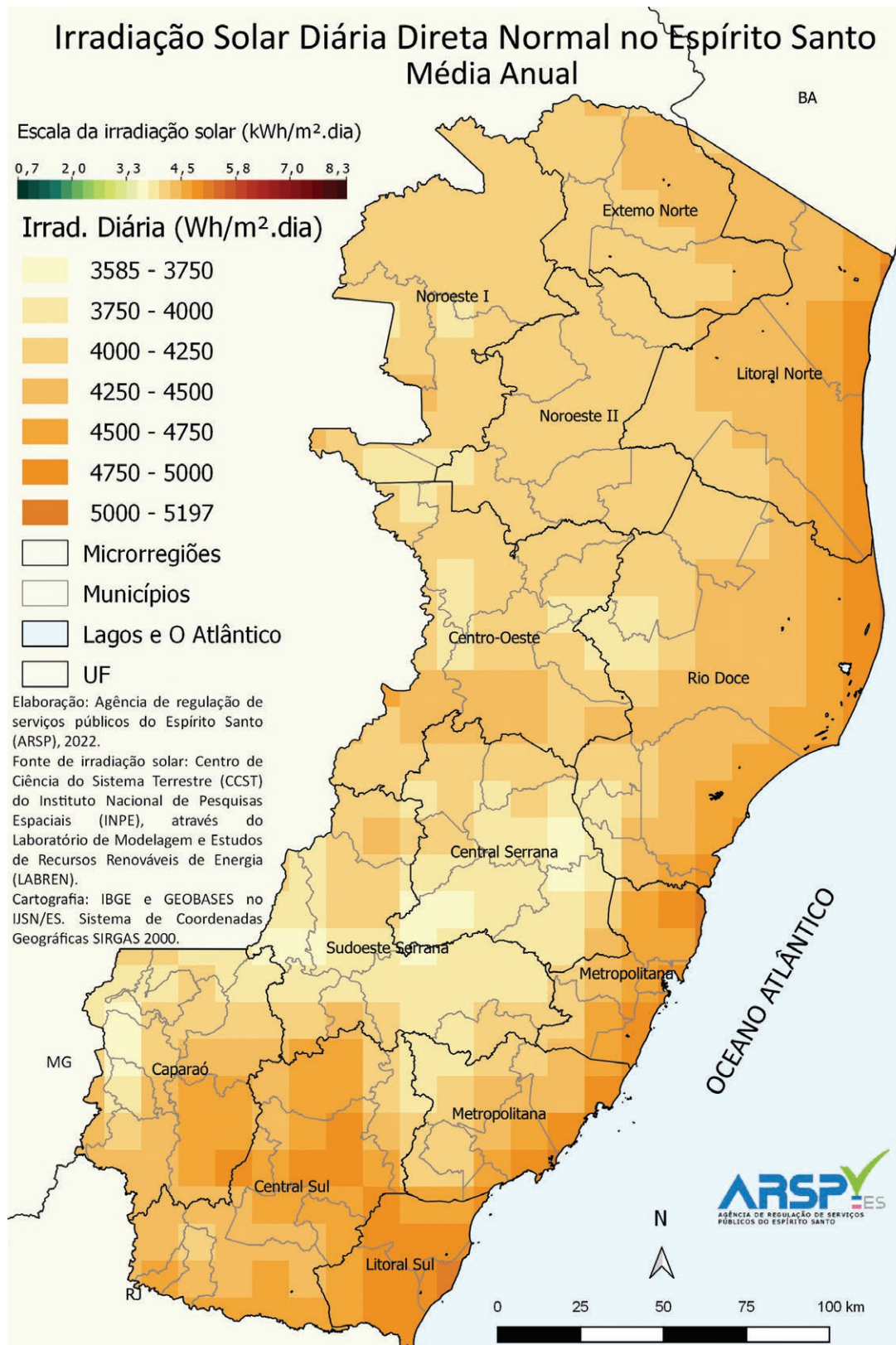




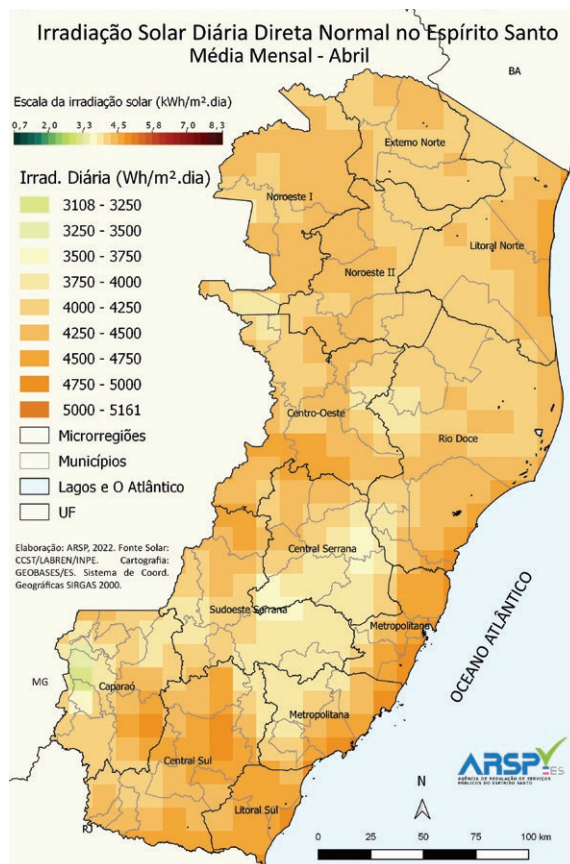
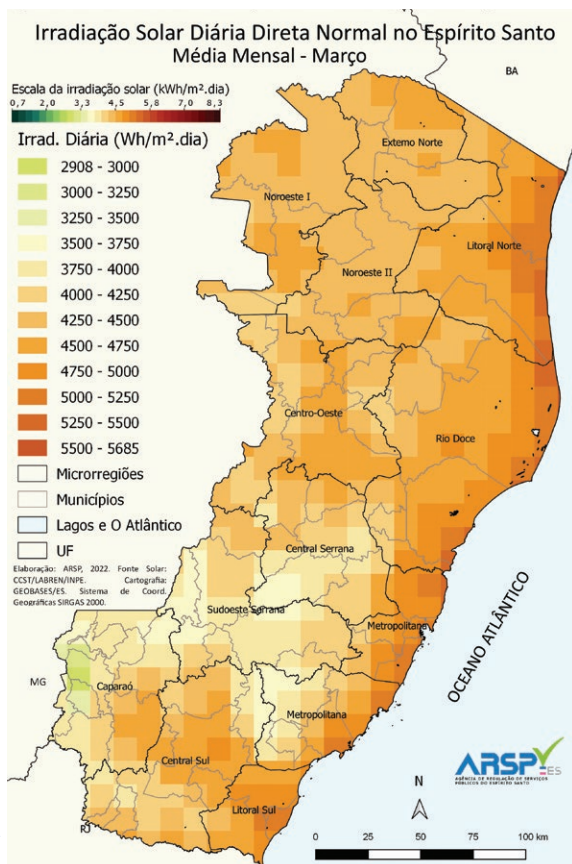
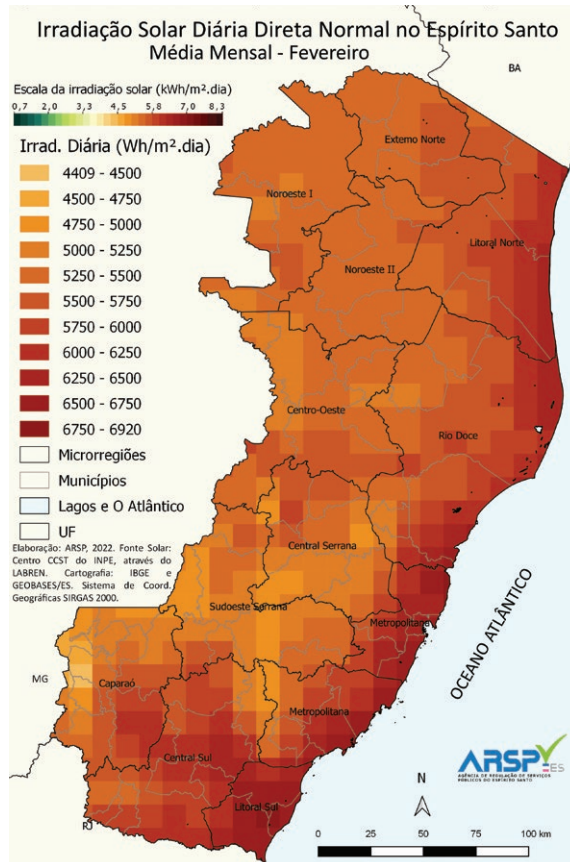
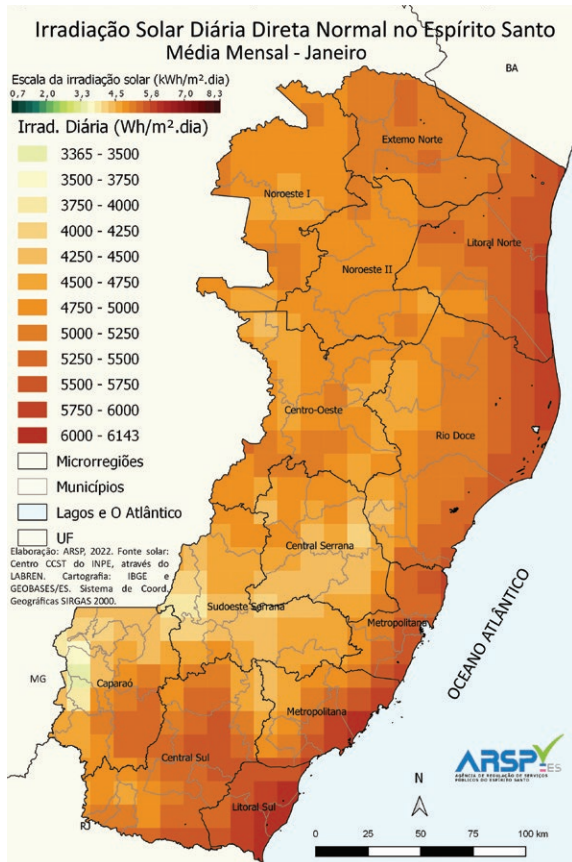


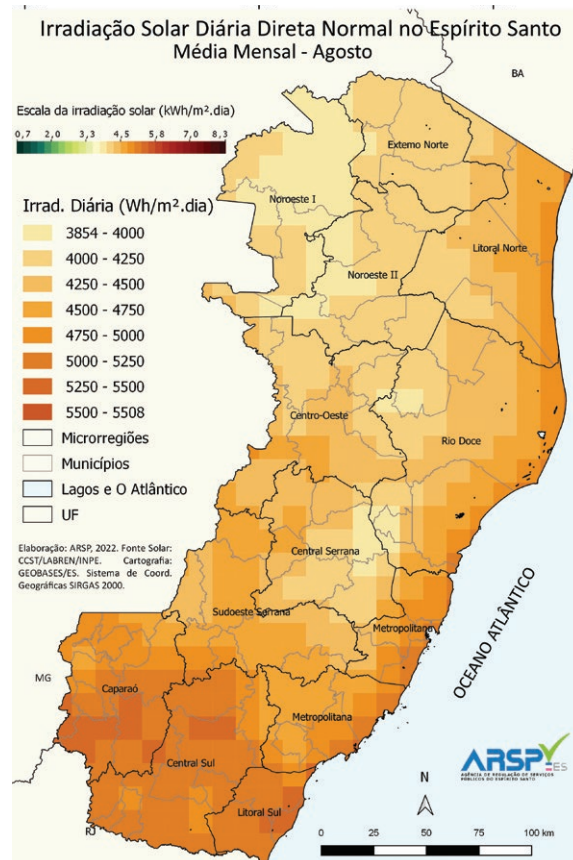
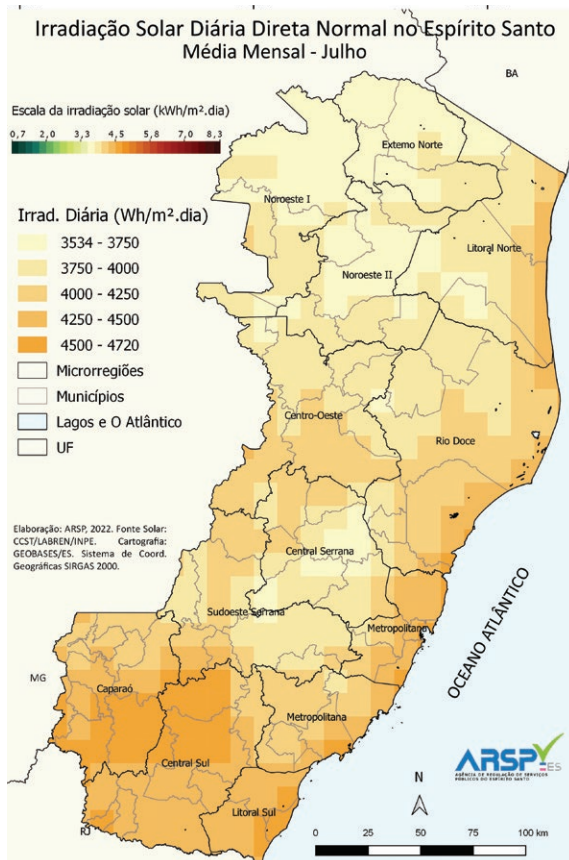
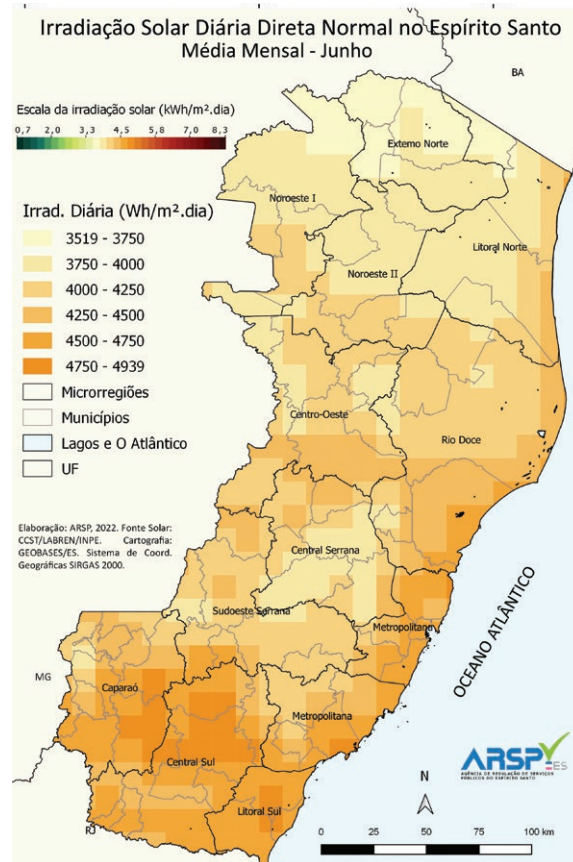
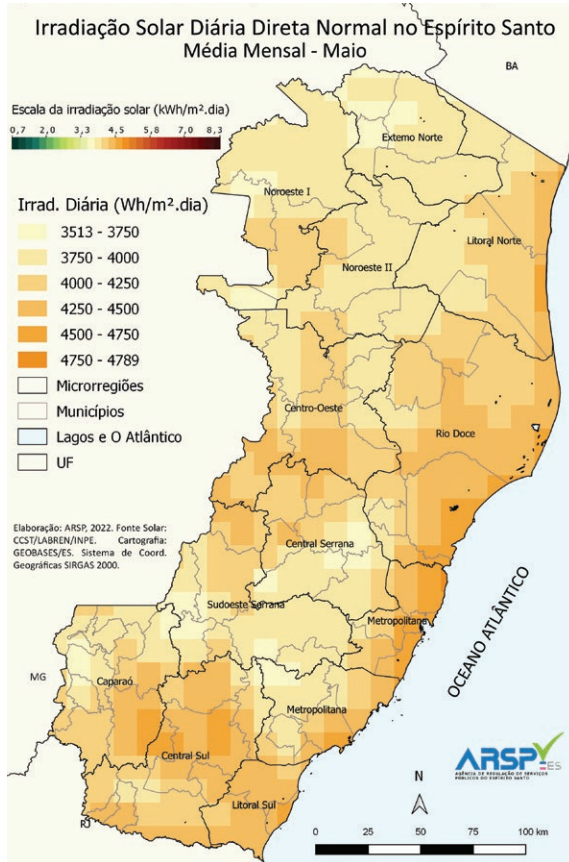
9.4 Mapas da irradiação solar direta normal no Espírito Santo (Wh/m².dia)

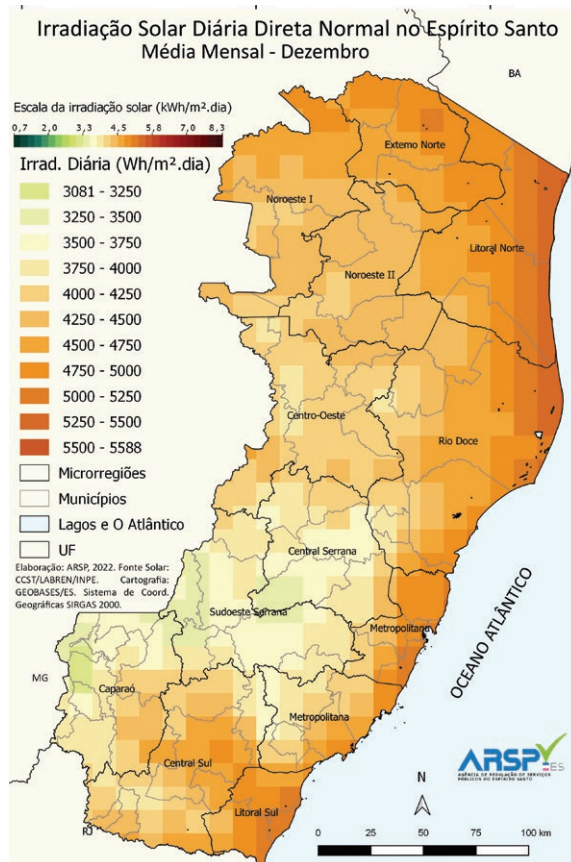
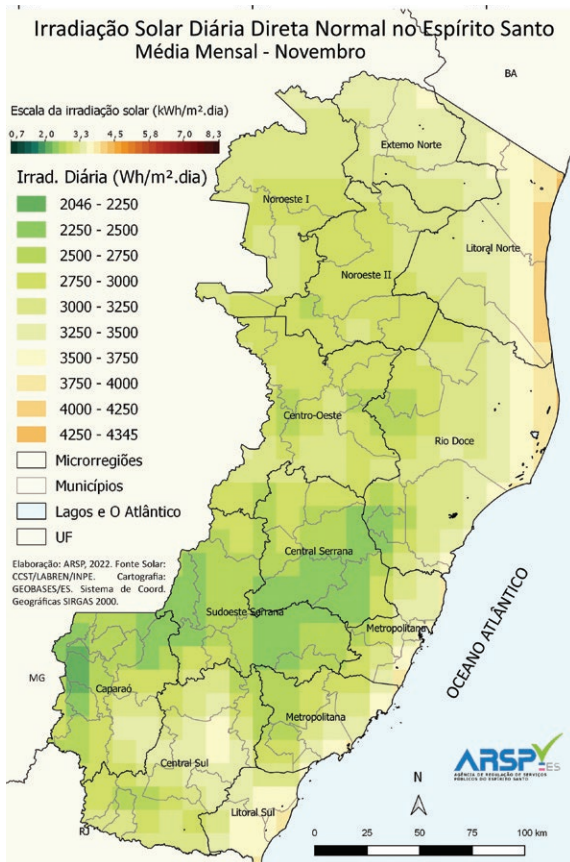
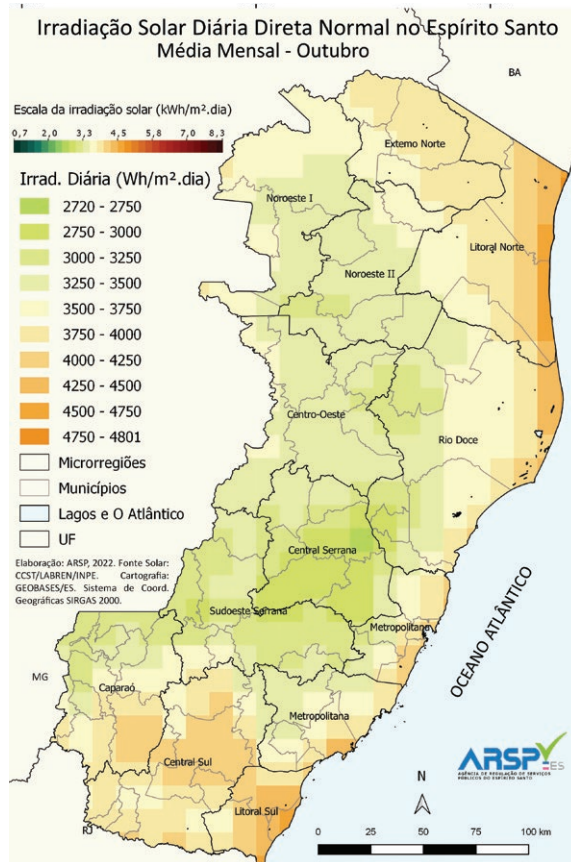
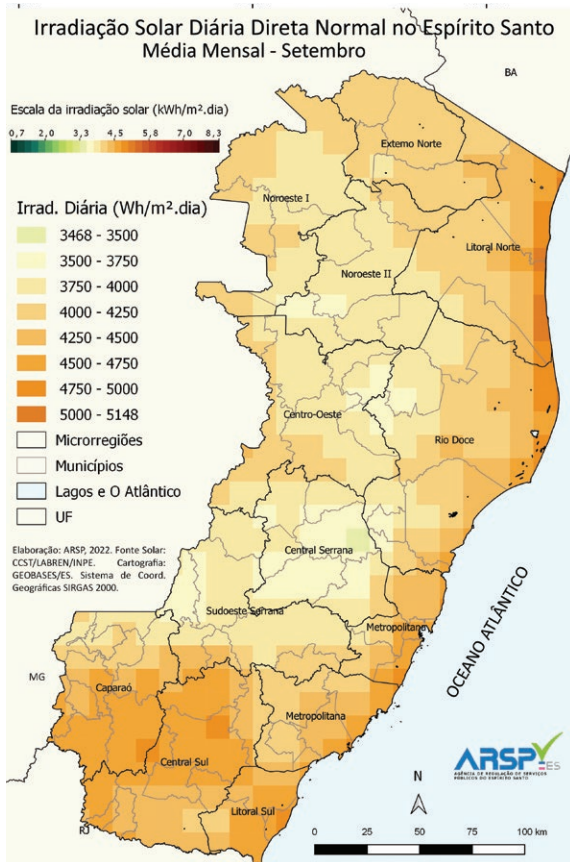
MAPA 9.5 Irradiação solar direta normal, total diário, média anual, no Espírito Santo (Wh/m².dia)



MAPA 9.6 Irradiação solar diária direta normal, médias mensais, no Espírito Santo (Wh/m².dia)

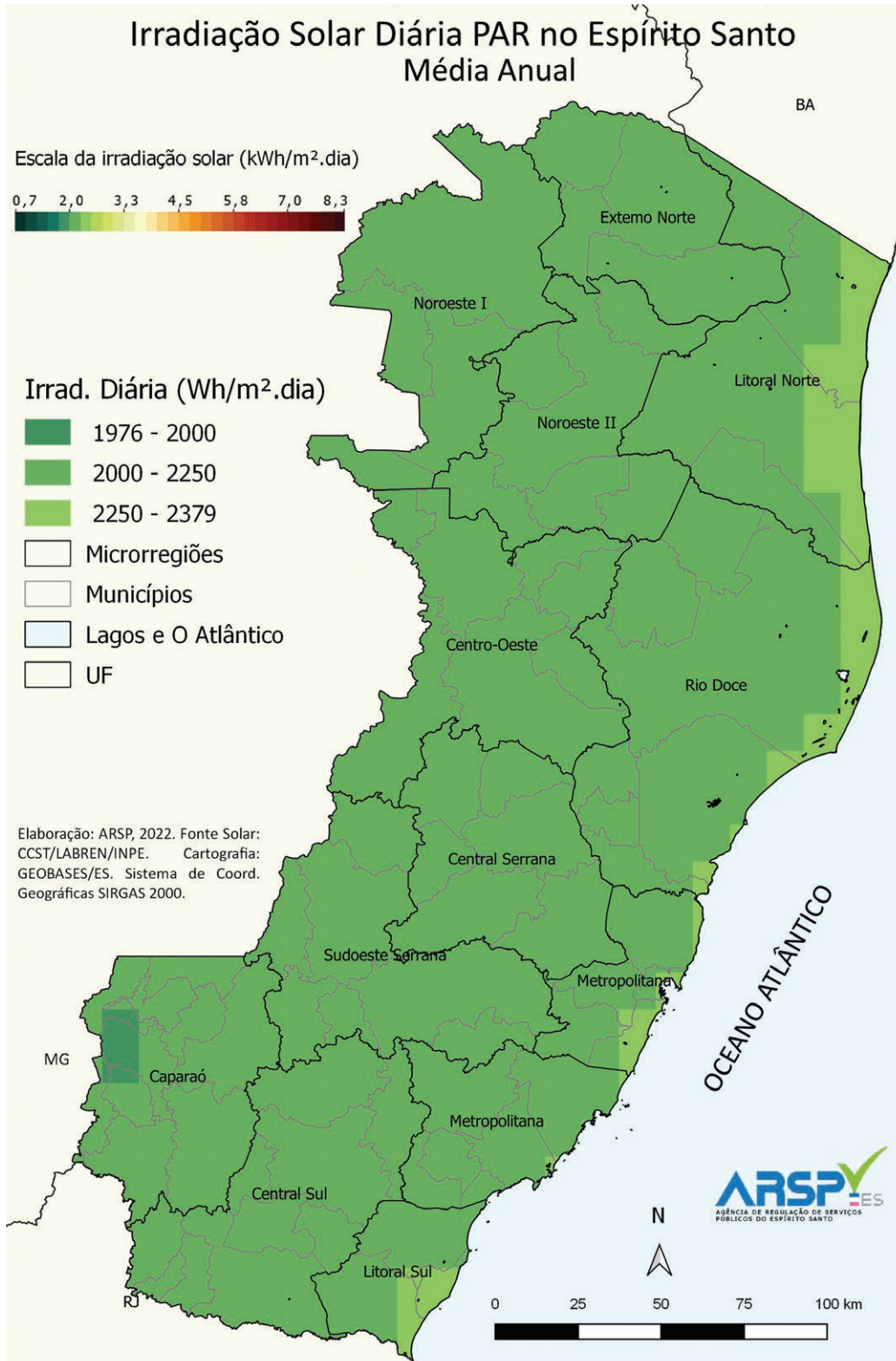




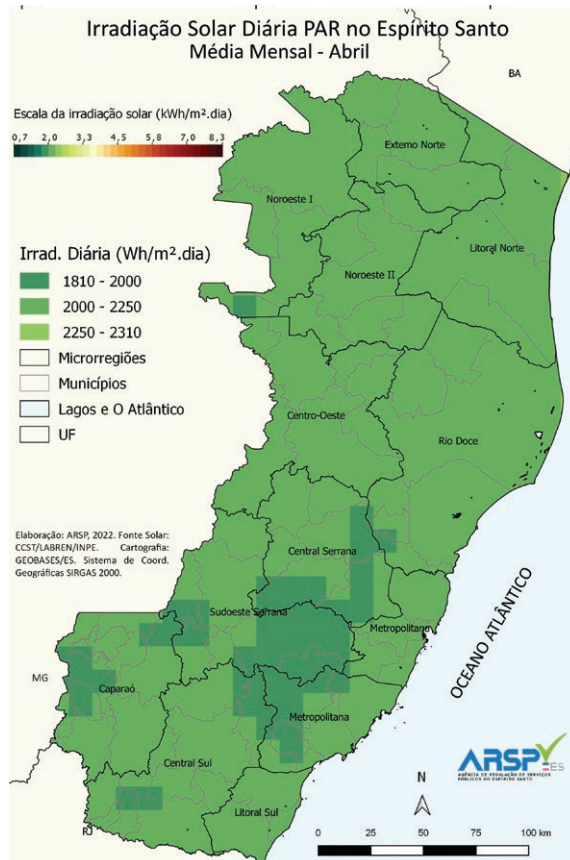
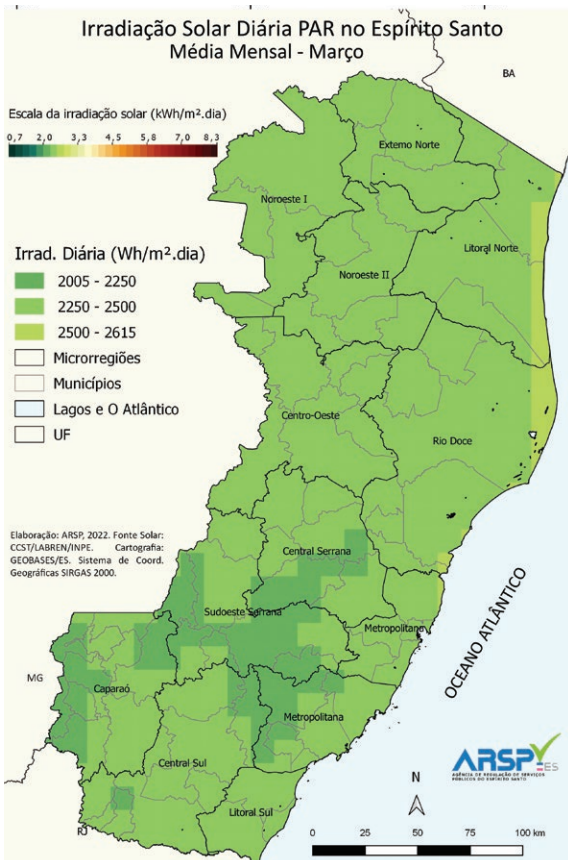
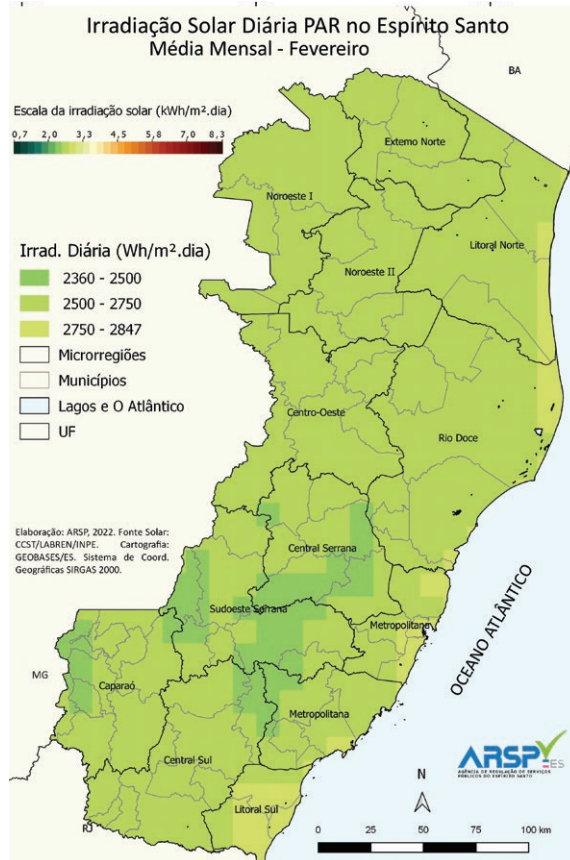
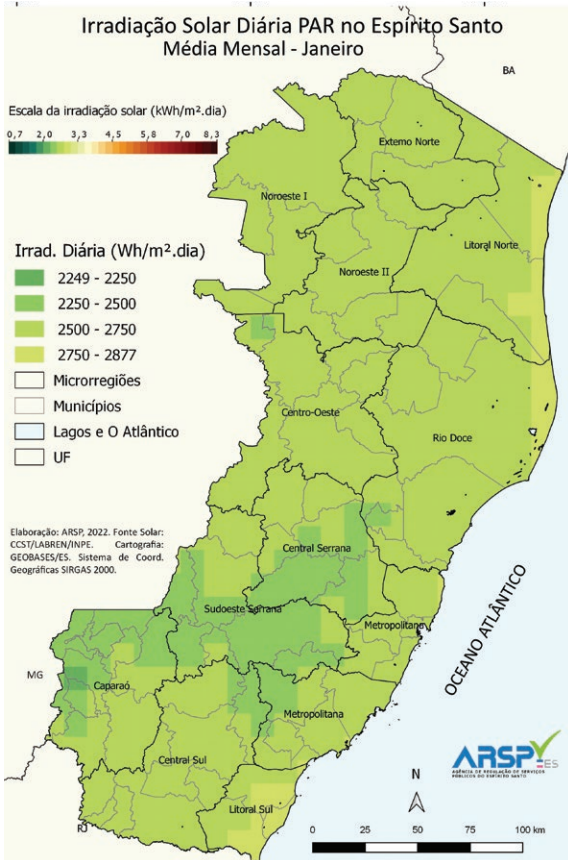


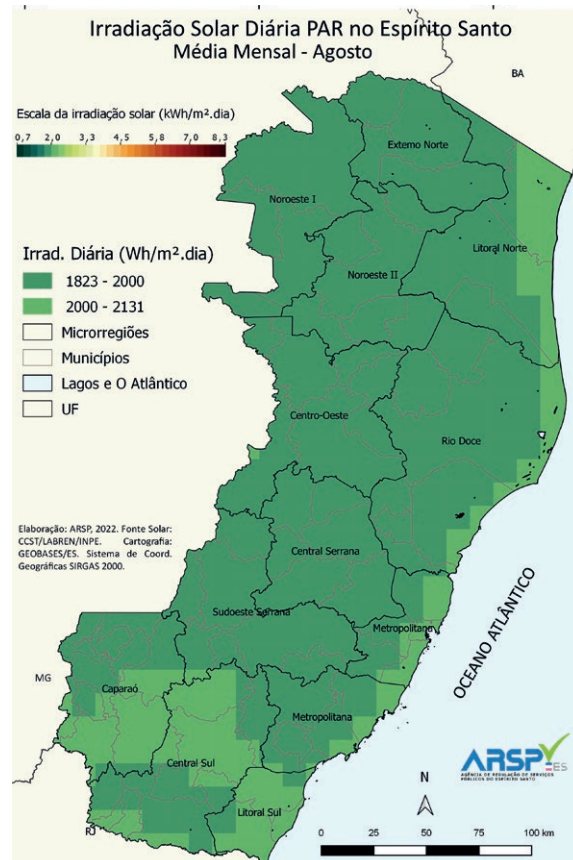
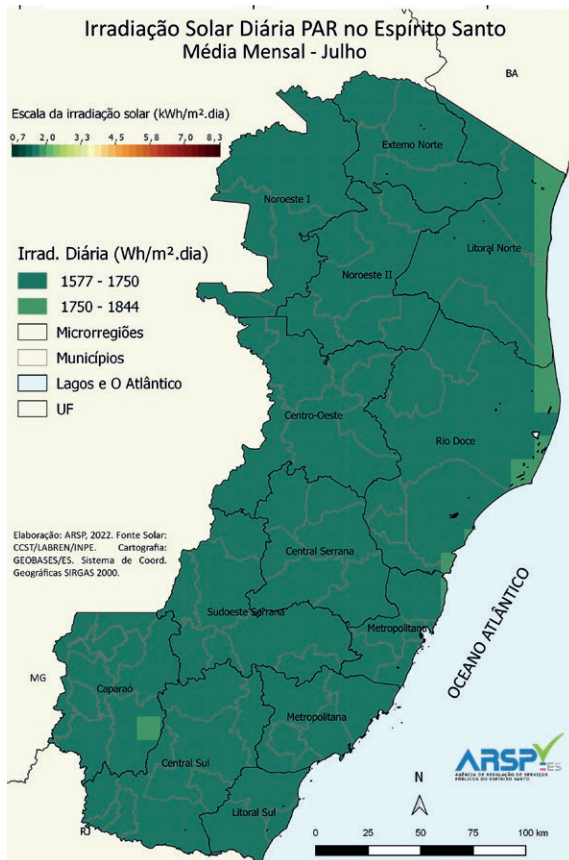
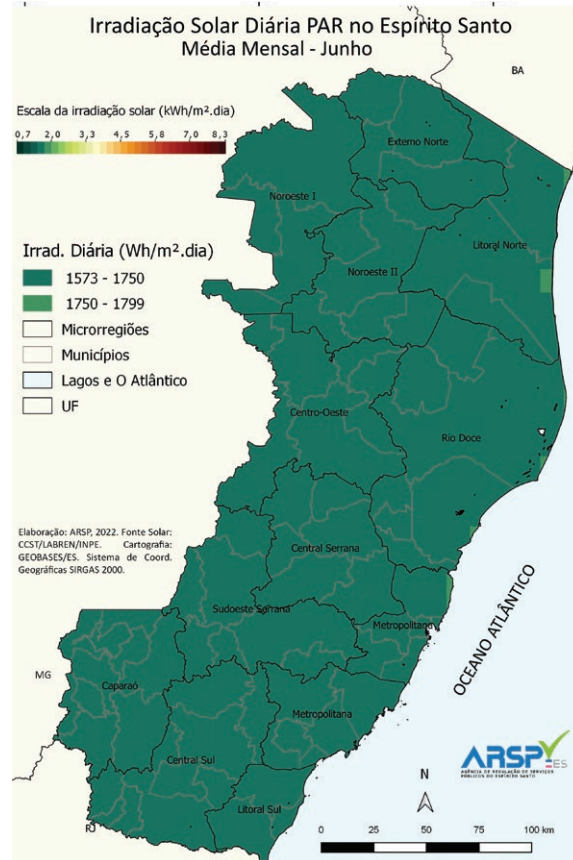
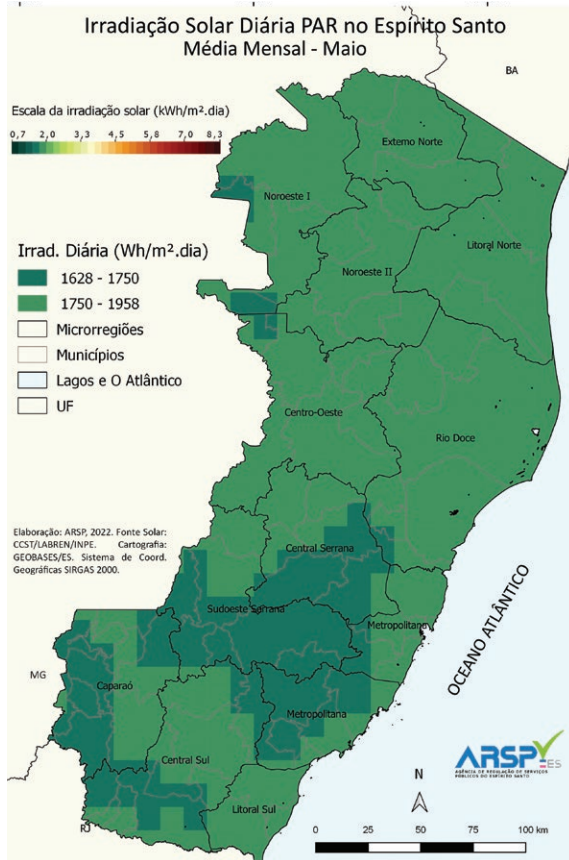
9.5 Mapas da irradiação solar PAR (Photosynthetically Active Radiation, ou Irradiação Fotossinteticamente Ativa)

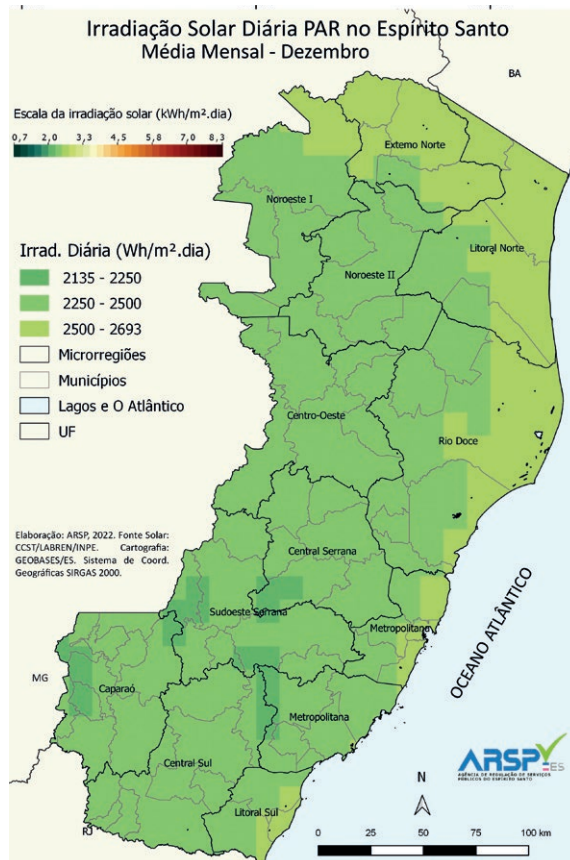
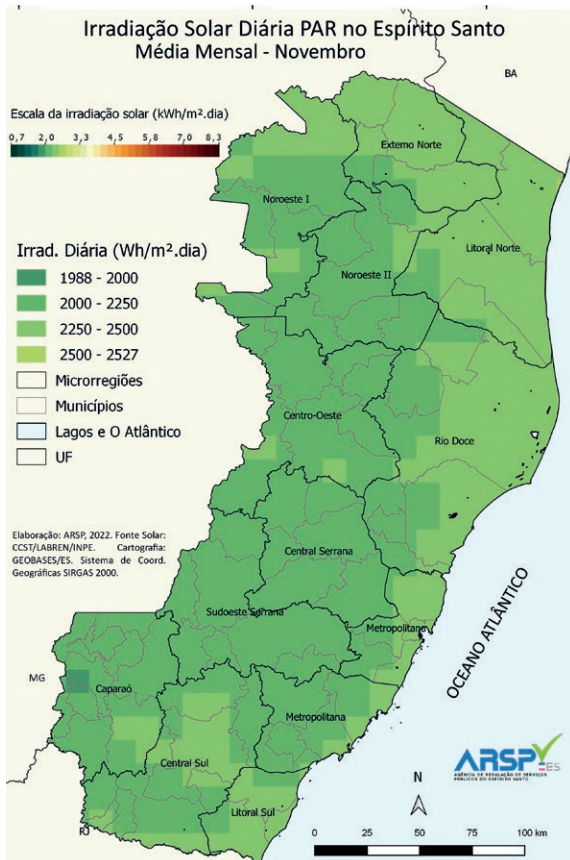
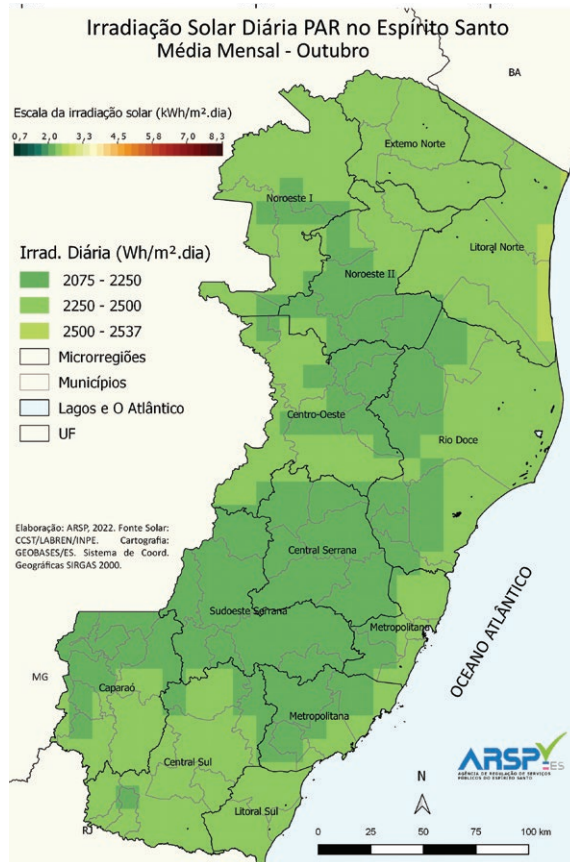
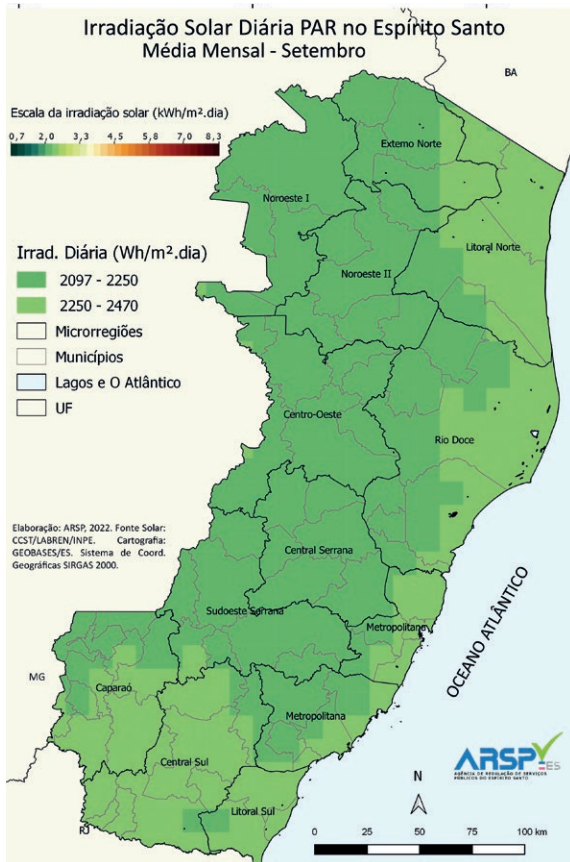
MAPA 9.7 Irradiação solar diária PAR, média anual, no Espírito Santo (Wh/m².dia)



MAPA 9.8 Irradiação solar diária PAR, médias mensais, no Espírito Santo (Wh/m².dia)







9.6 Análises dos Mapas de Irradiação Solar

A seguir está apresentada uma análise dos mapas de irradiação solar no Estado, mostrados nos tópicos 9.2 a 9.5.

O tópico 9.2 mostra os mapas de Irradiação Global Diária (IGD), média anual e mensais, no Estado do Espírito Santo. Na média anual da IGD são observados entre as regiões Sudoeste Serrana e Noroeste I a quantidade de **4,46 a 4,75 kWh/m²/dia**. Os valores mais altos podem ser vistos em praticamente todo o Sul e litoral do Estado, alcançando em torno de **5,24 kWh/m²/dia**, com destaque para esse máximo ocorrendo entre a Grande Vitória e a Metrópole Expandida Sul. Observa-se, assim, pouca variação entre o máximo e o mínimo de irradiação local. Em fevereiro, a IGD apresenta valores entre **5,58 e 6,77 kWh/m²/dia**, ao longo do Estado, com maior irradiação no litoral, reforçando a vocação do Espírito Santo para os empreendimentos de grande porte.

O mínimo observado e o máximo apresentados na primavera (setembro a novembro) pode ser visto na região Central-Serrana e nas áreas do polo de Linhares e Sudoeste Serrana mais próximas dela, de **5,49 e 5,57 kWh/m²/dia**. Durante o outono (março a maio), a disponibilidade de IGD passa a diminuir em razão da mudança na incidência dos raios solares no Hemisfério Sul, que se tornam cada vez mais tangenciais, mas não necessariamente por causa do aumento da cobertura de nuvens sobre o Estado, que entra em seu período seco. Nesta estação, o mínimo e o máximo de IGD encontram-se nas vizinhanças de Pedra Azul, ou seja, entre a região Sudoeste-Serrana e a área setentrional do polo de Cachoeiro de Itapemirim, possuindo valores mais baixos que aqueles observados no verão e na primavera, ficando entre **3,59 e 5,76 kWh/m²/dia**.

Os máximos de IGD podem ser observados na maior parte do litoral, no extremo sul e na região de divisa com Minas Gerais. No inverno (junho a agosto), uma área de máximo de IGD pode ser destacada entre o sudoeste da região Central-Serrana e a porção norte do Caparaó, de **4,06 a 4,67 kWh/m²/dia**. Similar à

primavera, os centros de mínima IGD ocorrem entre o polo de Colatina e o Extremo Norte/Noroeste I, com valores mais baixos, de **3,43 a 3,79 kWh/m²/dia**.

Os mapas das médias anual e mensais da **irradiação solar diária incidente sobre um plano inclinado (IPI)** são apresentados no Tópico 9.3. Esta configuração possibilita a máxima captação da energia solar incidente. Os maiores níveis de IPI podem ser observados, assim como no caso da IGD, no Sul e no Litoral do Estado, em março, de **5,33 a 6,45 kWh/m²/dia**. Os mínimos são visualizados praticamente nas mesmas áreas e épocas de mínima IGD, ou seja, entre o Centro e o Centro-Norte capixaba.

O Tópico 9.4 apresenta os mapas de **irradiação solar direta anual e mensal média (ISD)**. Assim como no caso da IGD e da IPI, a ISD mostra níveis mais elevados entre o Sul e o Litoral do Espírito Santo, com média anual entre **4,50 e 5,19 kWh/m²/dia**. Os menores níveis são encontrados entre o Centro e o Centro-Norte do Estado, alcançando média anual entre **3,58 e 4,5 kWh/m²/dia**.

Assim, de acordo com os mapas analisados, os maiores valores de irradiação solar são esperados para o sul e faixa litorânea capixaba, com pico de até **6,77 kWh/m²/dia de IGD em fevereiro, 6,45 kWh/m²/dia de IPI em março e 6,92 kWh/m²/dia de ISD em fevereiro**. Os menores valores devem ser encontrados em praticamente toda a Zona Central e Central-Norte do Espírito Santo, sendo de **3,43 kWh/m²/dia de IGD em março, 4,12 kWh/m²/dia de IPI em junho e 2,04 kWh/m²/dia de ISD em novembro**.

Quanto às médias anuais e mensais da **irradiação solar PAR (IPP)**, apresentadas nos mapas do Tópico 9.5, nota-se que os maiores níveis de IPP são observados, similarmente aos níveis da IGM e IPI, na região Sul e no Litoral capixaba, com picos entre a primavera e o verão, de até **2,87 kWh/m²/dia**. Os mínimos são visualizados praticamente nas mesmas áreas de mínima IGM e IPP, ou seja, entre o Centro e o Centro-Norte capixaba, com os menores valores em torno dos **1,57 kWh/m²/dia** em junho.

9.7 Mapa Solar Interativo – Proposta de Método para a cidade de Vitória, ES

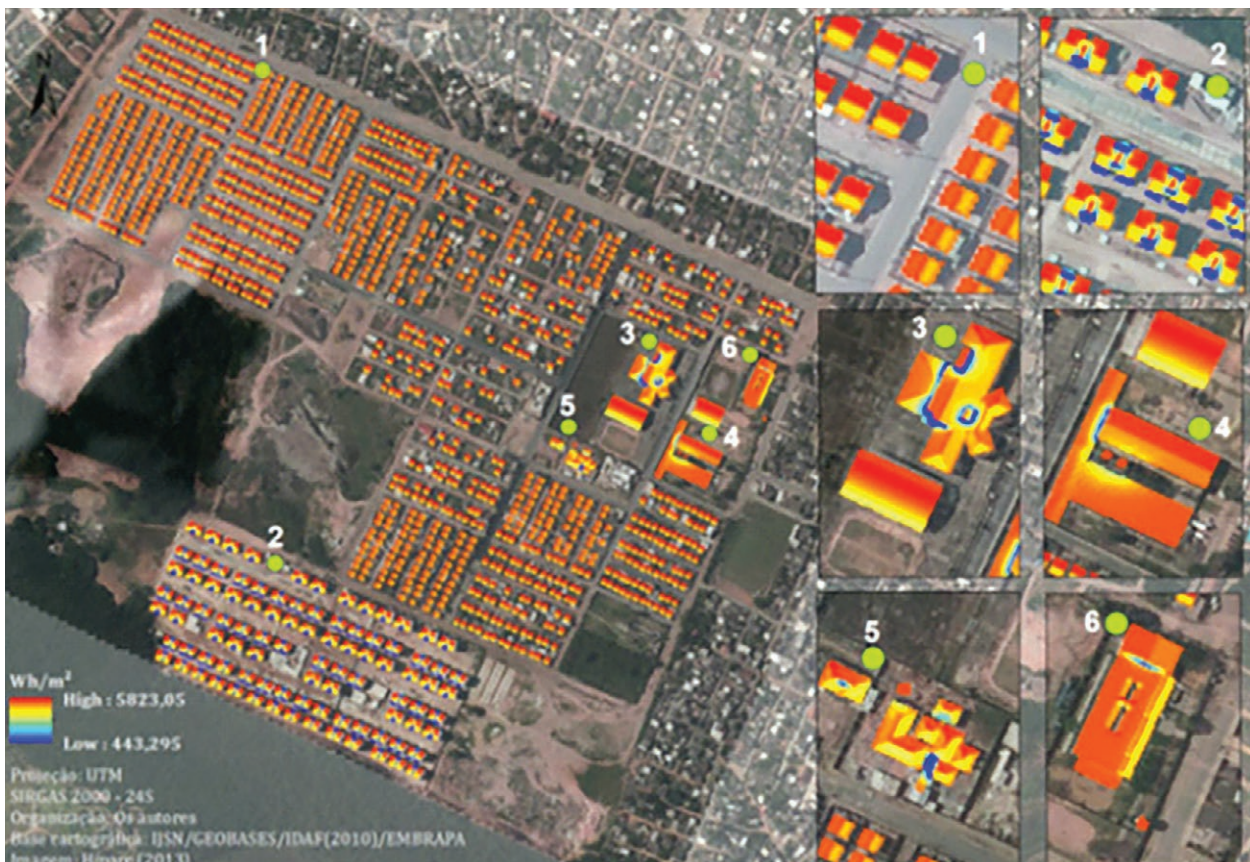
Este estudo se propõe ao desenvolvimento de uma metodologia para a elaboração de uma ferramenta capaz de investigar o emprego de sistemas de aproveitamento da energia solar em residências urbanas para a cidade de Vitória, no Espírito Santo, podendo futuramente se estender para a Região Metropolitana e todo o Estado. Apresenta um mapa solar interativo, disponibilizado gratuitamente em uma plataforma online, com a finalidade de indicar o potencial solar nas coberturas das edificações urbanas.

Além disso, com esse instrumento pretende-se apontar as viabilidades técnica e

econômica da implantação de sistemas de aproveitamento solar. A metodologia adotada se baseia no método de elaboração do Mapa Solar de Concepción/Chile (BAERISWYL-RADA, GARCÍA-ALVARADO, SANDOVAL-QUEZADA, 2016).

O mapa interativo encontra-se disponível no link <https://arcg.is/1qOr4C>. Ele também é apresentado pela figura a seguir. A dissertação encontra-se no link da referência 103: http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese_13521_LOHANE%20PALAORO%20-%20VERS%C3O%20FINAL.pdf.

MAPA 9.9 Irradiação solar nas coberturas das edificações do Residencial Jabaeté, Vila Velha, ES para a média anual (2018), modelo 3D



Fonte: Referência 103 – Dissertação Mapa Solar Interativo: proposta de método para Vitória/ES, 2019, CENTRO DE ARTES. Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, UFES, 2019. Cortesia da Autora, Lohane Barcelos Palaoro.



CAPÍTULO

10.

Aplicações da
Energia Solar

Os empreendimentos em energia solar são muito conhecidos e se tornaram cada vez mais relevantes, tanto no setor energético quanto em outras

áreas da sociedade. Neste capítulo são apresentados alguns exemplos, pedagogicamente divididos em cenário mundial, nacional e no Espírito Santo.

10.1 Usinas Solares no Mundo

10.1.1 Usina por Concentração Solar (CSP) com coletores cilindro-parabólicos, Shams 1, Abu Dhabi – Emirados Árabes^[49]

Uma das usinas de energia solar concentrada (Concentrated Solar Power – CSP) do mundo por meio de coletores cilindro-parabólico, a Shams 1, foi inaugurada em 2013, em Abu Dhabi, capital dos Emirados Árabes Unidos^[49], pela empresa Shams Power Company. A instalação tem 100 MW de potência instalada e pode fornecer energia para 20.000 casas no país, reduzindo as emissões de CO₂ em 175 mil toneladas por ano. O projeto levou cerca de dois anos e US\$ 600 milhões para virar realidade.

FIGURA 10.1 Usina por Concentração Solar (CSP) com coletores cilindro-parabólicos, Shams 1



NOTA: Usina Solar por Concentração (CSP), Shams 1, Abu Dhabi.

A Usina Shams 1 incorpora a tecnologia solar cilindro-parabólica mais inovadora e conta com 258.000 espelhos montados em 768 coletores cilindro-parabólicos para coletar a luz proveniente do sol, que atinge um fluido (óleo

sintético) para transferência de calor. O fluido se desloca por meio de tubos até um trocador de energia térmica. Esse processo produz o vapor que movimenta as turbinas para gerar a eletricidade.

Essas usinas são geralmente instaladas em regiões de maior insolação diária, como nesse exemplo.

10.1.2 Coletores cilindro-parabólico – Usina por Concentração Solar (CSP) com Torre Central, Califórnia – Estados Unidos da América

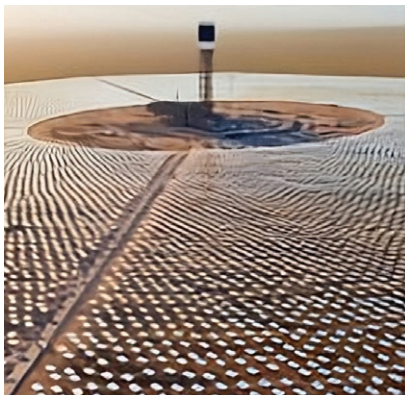
Os desertos do Estado da Califórnia, nos Estados Unidos da América (EUA), receberam várias propostas de projetos de energia solar de grande escala ^[51].

Em fevereiro de 2014, começou a operar um dos grandes projetos de energia solar concentrada (CSP) por Torre Central, o Projeto *Ivanpah Solar Electric Generating System (Isegs)*, localizado no Deserto de Mojave, com capacidade nominal de 377 MW, o suficiente

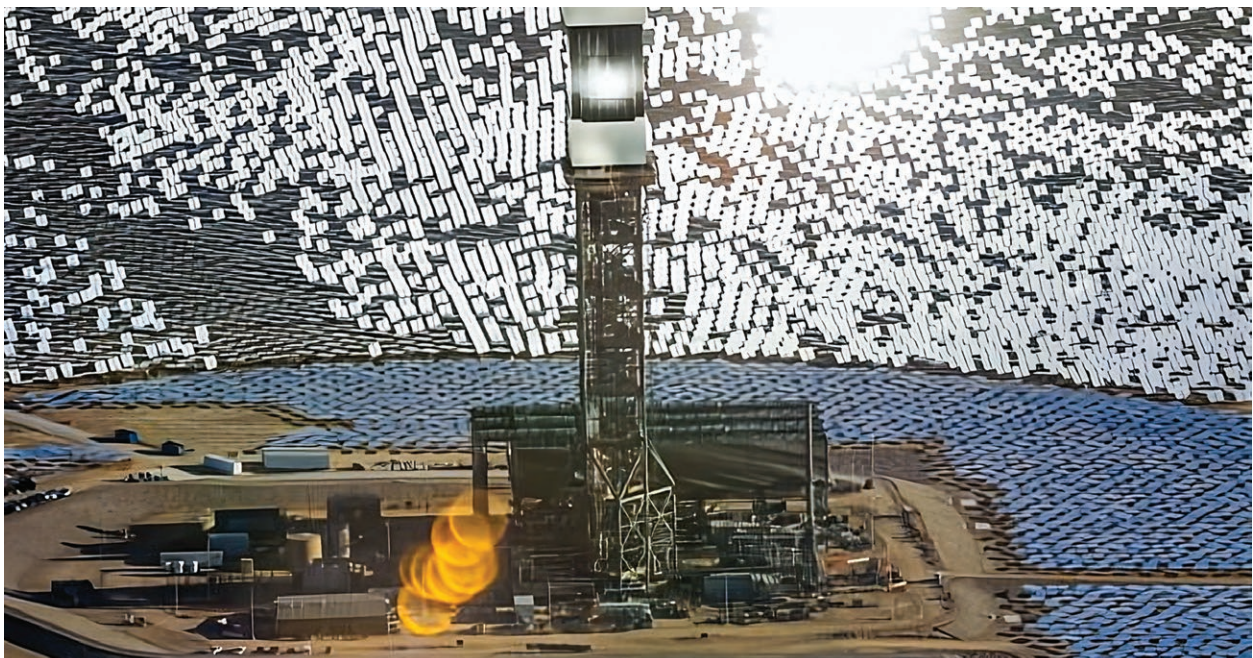
para abastecer 140 mil casas dos Estados Unidos ^[50] ^[52].

Um projeto previsto para iniciar a operação em 2020 é o Palen Solar Power, localizado em *Riverside County* e desenvolvido pelas empresas BrightSource e Abengoa, uma planta de aproximadamente 500 megawatts, composta por duas torres de 250 megawatts cada uma. Estarão entre as mais altas torres solares do mundo e produzirão energia suficiente para abastecer 200 mil residências ^[53] ^[54].

FIGURAS 10.2 Usina por concentração solar (CSP) em torre central, Califórnia, EUA



Fonte: BrighSource.



Fonte: Canal Tech. 17 de fevereiro de 2014. Nota: Usina na Califórnia de 392MW.

Os projetos com CSP são considerados mais eficientes em energia solar, referente ao espaço ocupado.

Segundo informações das empresas envolvidas, os projetos por CSP reduzem significativamente a quantidade de terra necessária para produzir energia, cerca de 33% de um típico projeto fotovoltaico^[51].

Vários projetos de energia solar em larga escala foram propostos no deserto da Califórnia, principalmente em terras federais.

A seguir, são apresentados os projetos que estão em vários estágios de aprovação pela Comissão de Energia da Califórnia^[51] e a produção potencial em megawatts para cada um.

FIGURA 10.3 Projetos solares por CSP no deserto dos EUA e suas potências instaladas (MWp)



- | | | | | |
|--|---|---|---|--|
| 1. Solar Millennium Ridgecrest 250 megawatts | 5. Sistema de geração elétrica solar Ivanpah 370 megawatts | 8. Energia Híbrida Victorville 2 563 megawatts (513 MW de gás natural, 50 MW solar) | 12. Solar Millennium Palen 484 megawatts | 17. Vale Imperial Solar 709 megawatts |
| 2. Beacon Solar Energy 250 megawatts | 6. Calico Solar 664 megawatts | 9. Fazenda Solar da Luz Solar do Deserto 550 megawatts | 13. Genesis Solar Energy 250 megawatts | 18. C Solar Oeste 250 megawatts |
| 3. Abengoa Mojave Solar 1 250 megawatts | 7. Cidade de Palmdale Híbrido a gás-solar 570 megawatts (520 MW de gás natural, 50 MW de energia solar) | 10. Colheita do Deserto 150 megawatts | 14. McCoy Solar 750 megawatts | 19. C Solar Sul 200 megawatts |
| 4. Hidden Hills Solar 500 megawatts | | 11. Energia Solar do Arroz 150 megawatts | 15. Solar Millennium Blythe 1.000 megawatts | 20. Monte. Fazenda Solar de Sinais No. 1 600 megawatts |
| | | | 16. Rio Mesa Solar 750 megawatts | 21. Centinela Solar Energy 275 megawatts |

Fonte ^[51]: ESRI, Departamento do Interior dos EUA, Bureau of Land Management, Comissão de Energia da Califórnia, BrightSource Energy, Basin e Range Watch.

10.2 Usinas solares fotovoltaicas de grande porte na América do Sul

A seguir, seguem dois exemplos de grandes usinas fotovoltaicas (FV) da América do Sul: Argentina e Brasil.

NA ARGENTINA

Na primeira edição do programa Renew^[90], promovido pelo governo argentino para o desenvolvimento de energia renovável, em 2019, mais de um milhão de painéis solares foram implantados

dentro do complexo Caucharí, dividido em três projetos de 100 megawatts de potência instalada, localizado na província de Jujuy, aproximadamente 4.200 metros acima do nível do mar.

Este projeto prevê reduzir os custos de energia e as emissões de Dióxido de Carbono (CO₂) em pelo menos 325.000 toneladas, de acordo com os precursores da iniciativa. O projeto envolveu um investimento de US\$ 390 milhões.

FIGURA 10.4 Parque Solar Caucharí, província de Jujuy, Argentina



Fonte: blogs.funiber.org^[90].

O BRASIL NO CONTEXTO DA AMÉRICA DO SUL

Em 2017^[91], a Enel inaugurou o que era na época o maior parque solar da América do Sul, o Parque Solar Nova Olinda, no Piauí.

Com capacidade instalada de 292 Megawatts (MW) e investimento de cerca de US\$ 300 milhões, o parque vai gerar energia suficiente para abastecer 300 mil residências.

Nessa usina, os painéis se movem acompanhando o movimento do sol, como se fossem girassóis, e captam a irradiação solar, que é transformada em energia elétrica. Esta, então, é levada por cabos subterrâneos a uma subestação no próprio parque e, de lá, segue por 47 quilômetros de linhas de transmissão até uma subestação da Chesf, onde é lançada no Sistema Interligado Nacional (SIN).

FIGURA 10.5 Parque Solar Nova Olinda, Piauí, Brasil



Fonte: O Globo^[91]. Economia, 28/11/2017.

10.3 Usinas solares brasileiras

Ao se observar o Mapa Brasileiro da Irradiação total em plano inclinado, no capítulo 1, figura 1.4, com origem no Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2ª Edição, ano 2017, verifica-se que todo o território nacional tem um potencial de insolação solar, em $\text{Wh}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$, propício à instalação das usinas solares.

10.3.1 Usina solar fotovoltaica São Gonçalo do Gurguéia, Piauí

A Usina Solar FV São Gonçalo do Gurguéia, no Piauí, entrou em operação em janeiro de 2020 ^[92]. Ela tem capacidade operacional de **475 Megawatts (MW)**, mas possui uma expansão de 133 MW, prevista para 2020, totalizando **608MWp** de potência instalada. O empreendimento demandou um investimento total aproximado de R\$ 1,8 bilhão.

O projeto é o primeiro da Enel a utilizar **módulos (placas) solares bifaciais**, que captam **luz de ambos os lados** e aumentam a eficiência em conversão elétrica da tecnologia.

Isso faz de São Gonçalo não só a maior usina solar do Brasil, mas também de toda a América do Sul.

Quando concluída, a usina São Gonçalo vai gerar 1.500 GWh (gigawatt-hora) por ano e evitar a emissão de 860.000 toneladas de CO₂ na atmosfera.

Quanto à destinação dessa planta, uma parte vai para o Sistema Interligado Nacional (SIN), enquanto **210 MW de potência destinam-se ao mercado livre de energia**.

FIGURA 10.6 Usina Solar Fotovoltaica São Gonçalo do Gurguéia, Piauí



Fonte: Bluesol^[92], 28 maio 2019.

10.3.2 As seis maiores usinas solares fotovoltaicas brasileiras até 2019

Até janeiro de 2019^[93], entre os projetos já em operação, concentrados em sua maioria na região Nordeste, as seis usinas com as maiores

potências instaladas no País, segundo os dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), eram:

1. Usina Solar Pirapora – Pirapora/MG	321 Megawatts;
2. Usina Solar Nova Olinda – Ribeira do Piauí/PI	210/292 Megawatts;
3. Usina Solar Ituverava – Tabocas do Brejo Velho/BA	196/254 Megawatts;
4. Usina Solar Bom Jesus da Lapa – Bom Jesus da Lapa/BA	158 Megawatts;
5. Usina Solar Guaimbê – Guaimbê/SP	150 Megawatts;
6. Usina Solar Apodi – Quixeré/CE	132 Megawatts.

FIGURA 10.7 Usina Solar Pirapora, em Pirapora, MG, 321 MWp



Fonte: Omegaenergia.com.br^[94]. Operação out 2017. Complexo Solar Pirapora.

FIGURA 10.8 Usina Solar Nova Olinda, Ribeira do Piauí, PI, 292 MWp



Fonte: celuloseonline.com.br^[93]. Apresentada na figura 10.7 e textos com detalhamento.

FIGURA 10.9 Usina Solar Ituverava, Tabocas do Brejo Velho, BA, 254 MWp



Fonte: Bahiadevalor¹⁹⁵¹, 18 de setembro de 2017. Início de operação em 2017.

FIGURA 10.10 Usina Solar Bom Jesus da Lapa, Bom Jesus da Lapa, BA, 158 MWp



Fonte: Enel.com.br¹⁹⁶¹, 28 de setembro de 2017. Entrou em operação em maio de 2017.

Essa usina gera cerca de 340 GWh por ano, o suficiente para atender ao consumo anual de mais de 166 mil residências brasileiras e evitar cerca de 198 mil toneladas de emissões de CO₂ na atmosfera.

FIGURA 10.11 Usina Solar Guaimbê, Guaimbê, SP, 150 MWp



Fonte: Foto^[97]: AES Tietê/Divulgação. O Complexo de Guaimbê possui 550 mil placas solares instaladas em uma área de 237 hectares. Inaugurado em 15 de agosto de 2019.

FIGURA 10.12 Usina Solar Apodi, Quixeré, CE, 132 MWp



Fonte: Equinor, Foto divulgação^[98]. Apodi Solar, localizada em Quixeré, Ceará. Operação iniciada em dezembro de 2018.

O Complexo Apodi Solar, em Quixeré, no Ceará, possui 162 MW. O empreendimento, no leilão de energia de reserva realizado em novembro de 2015, vendeu energia, por 20 anos, por meio de contrato com a Câmara de Comercialização de Energia (CCEE). A usina

solar está instalada a 218 km de Fortaleza (CE) e vai gerar 340 mil MWh por ano, suficientes para atender 170 mil residências. A energia limpa produzida pelo complexo equivale a uma redução de emissão de cerca de **200 mil toneladas de CO₂ por ano**.

10.3.3 Usinas solares fotovoltaicas flutuantes

As Usinas Fotovoltaicas Flutuantes (UFF) podem ser instaladas em diferentes tipos de espelho d'água^[99], pois praticamente qualquer corpo d'água, natural ou artificial, pode receber as placas solares sobre os flutuadores. Tais como:

- **LAGOS, REPRESAS E AÇUDES** Aplicações para o agronegócio trazem economia e segurança energética para a fazenda. Proporciona ganho no volume de água devido à menor evaporação, que resulta em maior capacidade da produção agrícola.
- **ATERROS SANITÁRIOS** Implantada no espaço inutilizado do aterro sanitário utilizando estruturas plásticas.
- **ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO** A usina flutuante proporciona o

aumento da capacidade de oferta hídrica, torna a operação mais rentável e com a energia gerada pode atender o consumo elétrico da companhia.

- **RESERVATÓRIOS DE HIDRELÉTRICAS** As usinas flutuantes em reservatórios de hidrelétricas possuem a grande vantagem de aproveitar a infraestrutura já existente de subestação e transmissão, reduzindo os custos de ligação à rede. Contribui na redução de evaporação da água e possui ainda maior relevância em locais que apresentam baixo nível dos reservatórios. A aprovação ambiental é muito mais rápida e menos custosa que em solo, pois os reservatórios são áreas antropizadas (previamente impactadas pelo homem) que já dispõem de uma licença ambiental.

VANTAGENS E DESVANTAGENS

VANTAGENS

- **LIBERAÇÃO DE TERRAS**
É o principal benefício da tecnologia e possivelmente a razão pela qual nasceu a ideia de instalar placas solares sobre a água. Primeiramente, evita o uso de terras que poderiam ser aproveitadas para a agricultura ou mesmo ocupação. Em segundo lugar, agrega ainda mais sustentabilidade aos projetos solares, pois elimina a necessidade de remoção de árvores e a supressão da vegetação rasteira devido ao sombreamento dos módulos.
- **REDUZ EVAPORAÇÃO**
O sombreamento é benéfico, pois ameniza o calor sobre a superfície da água e assim ajuda a reduzir a sua evaporação. Além disso, o sombreamento ao resfriar a água, no caso de lagos e represas, ajuda a evitar a proliferação de algas prejudiciais.
- **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**
As temperaturas mais baixas sobre a superfície da água também impulsionam a

geração de energia fotovoltaica, esfriando as placas solares. Segundo alguns estudos realizados, o ganho em eficiência do arranjo fotovoltaico em uma usina flutuante é de 5% a 15%.

- **RASTREAMENTO**
Um recurso para aumentar a produção de energia das placas solares é o sistema de rastreamento (*tracking*, no inglês). Com o uso de suportes mecânicos especiais controlados por computador, as placas podem ser rotacionadas para estarem sempre em face direta com o sol. Em uma usina flutuante esse recurso pode ser mais facilmente aplicado, rotacionando a plataforma toda para obter um rastreamento vertical.

DESVANTAGENS

- No momento, a única desvantagem das usinas flutuantes em relação aos projetos em terra ainda é o seu maior custo de instalação e manutenção. Por se tratar de uma

tecnologia relativamente nova, os flutuadores ainda são caros de produzir e respondem por grande parte dos custos de um projeto.

→ Contudo, da mesma forma que nos projetos em terra ou em telhados, os custos de instalação de usinas flutuantes devem continuar a cair à medida que a tecnologia avança.

PROJETOS DE USINAS SOLARES FLUTUANTES NO MUNDO

Após os primeiros projetos pilotos instalados no Japão, na Coreia e nos Estados Unidos, o mercado de solar flutuante se espalhou pelo mundo.

Assim como nas instalações em terra, a China é a maior produtora de energia solar sobre flutuadores do mundo.

Segundo estudo do Banco Mundial, outros países que já possuem projetos em operação são: Austrália, Brasil, Canadá, França, Índia, Indonésia, Israel, Itália, Malásia, Maldivas, Holanda, Noruega, Panamá, Portugal, Singapura, Espanha, Suécia, Sri Lanka, Suíça, Taiwan, Tailândia, Tunísia, Turquia, Reino Unido e Vietnã.

→ **MAIOR USINA SOLAR FLUTUANTE DO MUNDO**
Sobre o lago de uma mina de carvão desativada

na cidade de Huainan, na província de Anhui, na China, está instalada a maior usina solar flutuante do mundo. Com 40 MW de potência instalada, utiliza 166 mil placas solares sobre flutuadores e é capaz de atender 15 mil residências.

A cidade de Huainan, província de Anhui na China^[100], conhecida por seu terreno rico em carvão, conta com uma usina solar flutuante de **40 MW**, a maior do mundo nessa categoria. Ela fica localizada em uma área de mineração que está inundada devido às chuvas, com profundidade de água entre 4 m e 10 m.

A China planeja uma usina solar que será a maior do mundo, com seis milhões de painéis fotovoltaicos. Com capacidade de 2 gigawatts (GW), custará um total de US\$ 2,3 bilhões.

FIGURA 10.13 Usina solar fotovoltaica flutuante na China, 40 MWp



Fonte: Tecnoblog.net^[100]. A usina foi instalada num lago de uma mina de carvão abandonada. Iniciou a geração em maio de 2017.

USINA SOLAR FOTOVOLTAICA FLUTUANTE DE SOBRADINHO – BA

Inaugurada em agosto de 2019^[99], a usina solar flutuante do reservatório da hidrelétrica de Sobradinho, no Rio São Francisco, é atualmente a maior do tipo no Brasil.

FIGURAS 10.14 Usina solar fotovoltaica flutuante no reservatório de Sobradinho, BA



Fonte imagens: Portal solar, esenergy.com.br e bluesol.com.br^[99]. Usina solar flutuante no reservatório de Sobradinho. Inaugurada em agosto de 2019.

USINA SOLAR FOTOVOLTAICA FLUTUANTE EM FAZENDAS

A tecnologia de armazenar a água da chuva e no mesmo local gerar energia renovável já é realidade na Fazenda Figueiredo das Lages, em Cristalina (GO), no entorno do Distrito Federal^[101].

A lagoa artificial, que é abastecida com águas das chuvas por captação dos telhados dos

galpões da fazenda e é utilizada para irrigação, recebeu 1.150 painéis fotovoltaicos.

A estimativa é que os painéis gerem 304 quilowatts-pico (kWp), o que garante uma produção estimada de 50 megawatts-hora/mês (MWh/mês). A energia produzida na propriedade equivale às necessidades anuais de consumo de mais de 170 domicílios populares brasileiros.

Essa usina fotovoltaica sobre um lago é a primeira no Brasil e foi desenvolvida entre 2016 e 2017.

FIGURAS 10.15 Usina solar fotovoltaica flutuante em fazendas

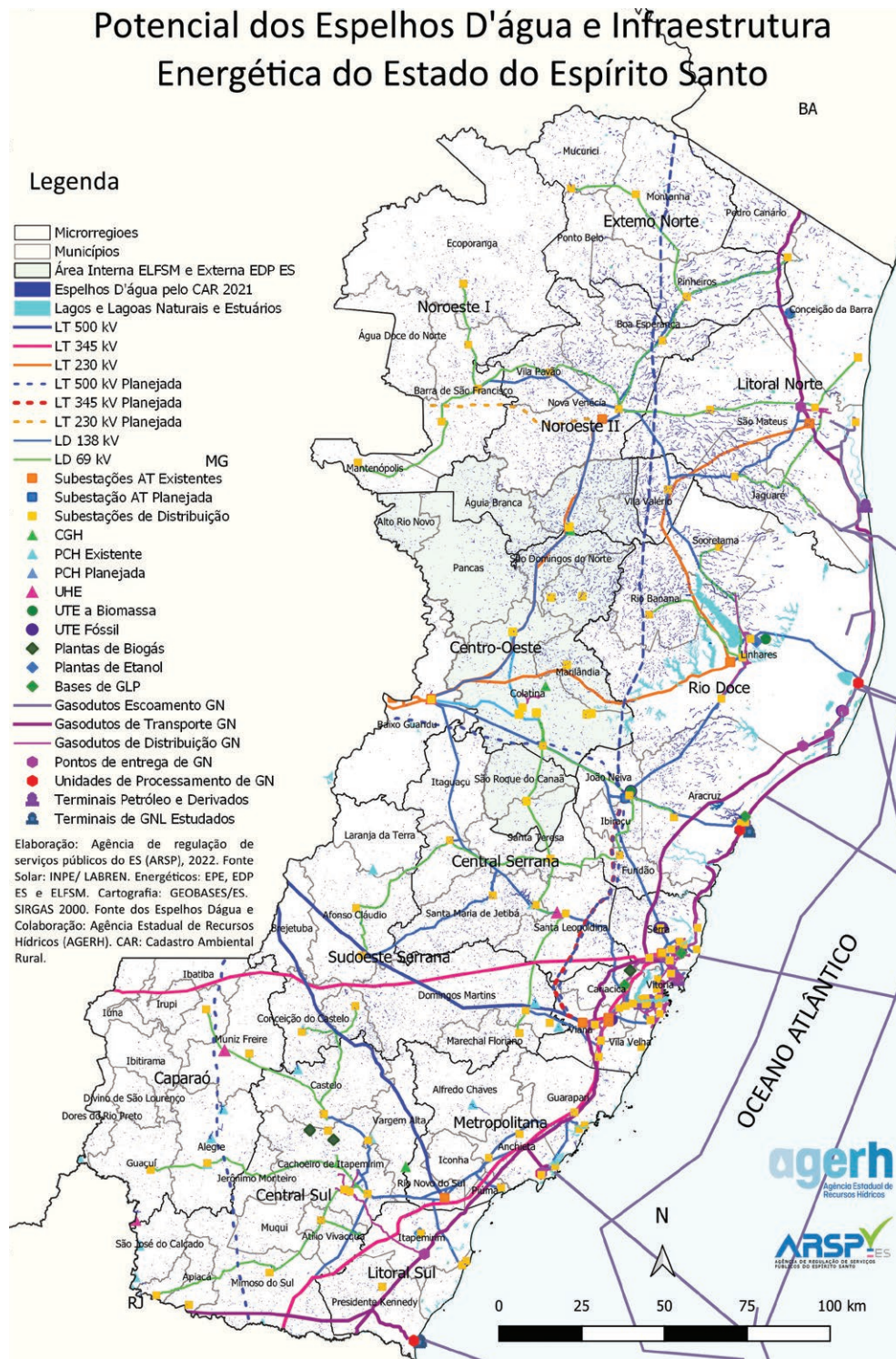


Fonte: vegasolar.com.br^[101]. Jornal da Bioenergia 14/08/2017. Usina Solar Flutuante produz 14% mais de energia elétrica e reduz a evaporação em até 70%. E Carlos Costa/Arquivo, 28 de agosto de 2017.

10.3.4 Os espelhos d'água e suas potencialidades no Espírito Santo

Os espelhos d'água no Estado do Espírito Santo registrados no CAR, os lagos e as lagoas naturais e os estuários, as suas potencialidades energéticas e as relações com a agropecuária são os destaques neste tópico.

MAPA 10.1 Potencial dos Espelhos D'água e Infraestrutura Energética do Espírito Santo



Fonte dos Espelhos D'água: Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural (SICAR), 2021. Elaboração AGERH e ARSP, 2023.

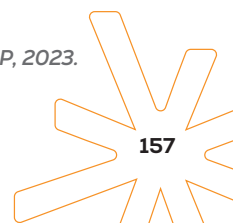


TABELA 10.1 Potencial dos Espelhos D'água no Espírito Santo pelo CAR

ESPELHOS D'ÁGUA ARTIFICIAIS NO ESPÍRITO SANTO				
CLASSES DOS ESPELHOS (ha)	QUANTIDADES	ÁREA SOMADA (ha)	POTÊNCIA FOTOVOLTAICO INSTALÁVEL (GWp)	FV EM 10% DOS ESPELHOS D'ÁGUA (GWp)
>= 8	221,00	4.077,00	4,08	0,41
4 a 8	488,00	2.647,00	2,65	0,26
1 a 4	3.387,00	6.222,00	6,22	0,62
0,4 a 1	5.926,00	3.755,00	3,76	0,38
< 0,4	34.521,00	3.678,00	3,68	0,37
TOTAL	44.543,00	20.379,00	20,38	2,04

Fonte: Serviço Florestal Brasileiro (SFB), CAR-ES, dados coletados em junho de 2021. Adaptação pela Agerh e ARSP em 2023. Definição: 1 ha = 10.000 m². Obs.: Considerou-se 1MWp de potência instalada fotovoltaica por ha.

O Estado do Espírito Santo tem mais de 40 mil espelhos d'água, segundo registros do Cadastro Ambiental Rural (CAR), declarados pelos proprietários rurais capixabas. A área somada equivale a **0,44% da área total do Estado** (46.095,593km² = 4.609.559,3ha, pois 1ha = 10.000m²), conforme pode ser verificado na tabela e no mapa dos espelhos d'água. Analisando a área deles, verifica-se um potencial em torno de **2GWp** se usados apenas **10% para usinas fotovoltaicas flutuantes**, o equivalente a quase toda potência instalada elétrica no Espírito Santo atualmente.

Há também uma área de **23.246ha** em lagoas e lagos naturais e estuários, correspondendo a **0,5%** do território estadual. Somando-se ao potencial dos espelhos d'água artificiais, alcançam **1%**, ou seja, **10%** dessa área propicia **4,3GWp** potencialmente.

Esses espelhos d'água propiciam a implantação dos chamamos **sistemas agrovoltáicos/agrivotáicos**, que consistem na geração de eletricidade por meio de painéis fotovoltaicos associada à produção agropecuária. Têm amplo espectro de utilização em sistemas de irrigação, criação de peixes, camarão e crustáceos sob painéis fotovoltaicos nos espelhos d'água artificiais e naturais, lagos, lagoas, reservatórios de hidrelétricas, oceanos, entre outros.

Portanto, sob o ponto de vista solar integrado ao hídrico, o Espírito Santo tem o potencial gravitacional dos rios (em parte explorado), das ondas e correntes marinhas e dos espelhos d'água como fontes para a geração de energia. Somam-se às demais fontes para autonomia energética e neutralidade na emissão de carbono, conforme o Plano Estadual de Neutralização de Carbono 2050.

10.3.5 Sistemas agrovoltáicos, usos e funcionamento

Os sistemas agrovoltáicos (APV) representam uma abordagem inovadora para maximizar o uso da terra ao combinar a produção agrícola com a geração de energia solar. Este conceito é baseado na instalação de painéis fotovoltaicos em áreas de cultivo, criando um ambiente multifuncional que permite o cultivo de plantas e a produção de energia elétrica no mesmo espaço. A seguir são abordados o funcionamento desses

sistemas, as suas componentes, os benefícios, os desafios e as perspectivas.

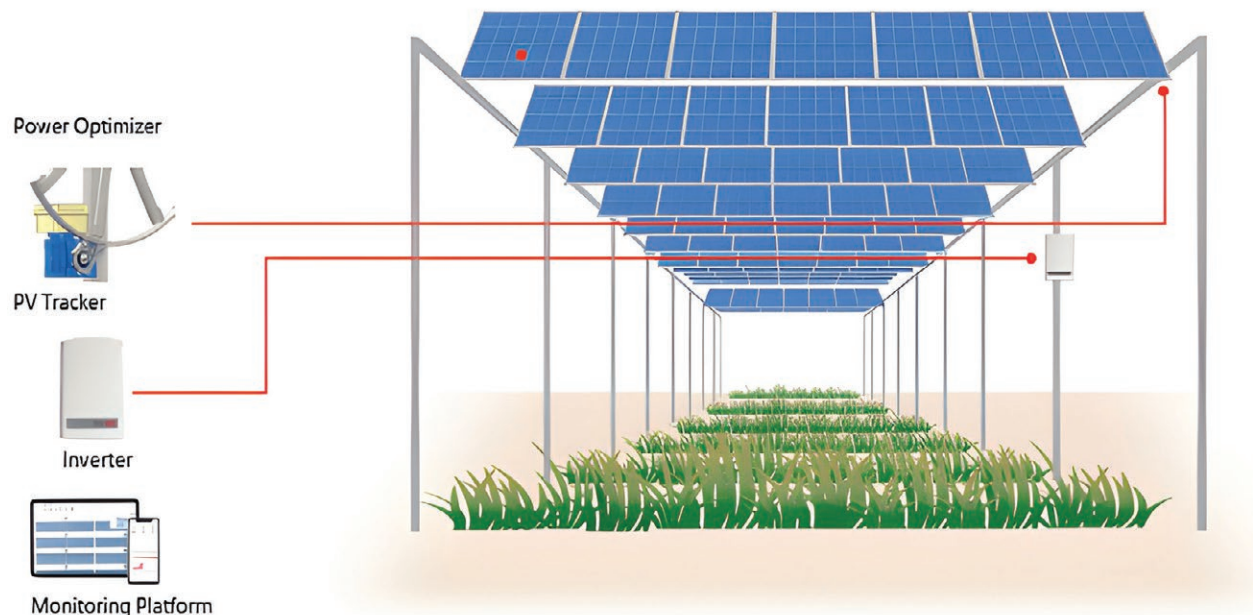
Os sistemas agrovoltáicos integram painéis solares com atividades agrícolas e da pecuária. Eles podem ser configurados de várias maneiras para se adequar às necessidades específicas de cultivo, criação de animais e geração de energia. A estrutura básica de um sistema agrovoltáico inclui:

- **PAINÉIS FOTOVOLTAICOS** Instalações de painéis solares são posicionadas sobre ou ao lado das áreas de cultivo e criadouros. Estes painéis convertem a luz solar em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico.
- **ESTRUTURAS DE SUPORTE** Os painéis são montados em estruturas elevadas, geralmente sobre suportes ajustáveis ou estandes, para criar espaço suficiente para o

cultivo das plantas. A altura e o espaçamento das estruturas são projetados para otimizar a penetração da luz solar para as culturas e a eficiência da geração de energia.

- **SISTEMA DE IRRIGAÇÃO** O sistema pode incluir métodos avançados de irrigação para otimizar o uso da água, muitas vezes complementado por técnicas de captura e reutilização de água da chuva.

FIGURA 10.16 Esquema de funcionamento do sistema agrivoltáico



Fonte: AgriVoltaics Conference Catalog – 2022, apresentado pelo Incaper.

Existem diversas configurações para os sistemas agrivoltáicos, adaptadas às necessidades específicas de cultivo, manejo e eficiência da geração de energia:

- **PAINÉIS ELEVADOS** São instalados em estruturas elevadas, permitindo o cultivo de culturas embaixo deles. Esta configuração é ideal para áreas com alta demanda de cultivo e onde a sombra moderada pode ser benéfica.
- **PAINÉIS MONTADOS HORIZONTALMENTE** São montados em uma inclinação fixa ou ajustável. Este tipo pode ser mais apropriado para culturas de baixo porte ou áreas onde o sombreamento é vantajoso, incluindo os espelhos d'água locais.

- **PAINÉIS VERTICAIS** São montados verticalmente, frequentemente em áreas urbanas ou em pomares de árvores frutíferas. Esta configuração pode ser usada para maximizar a exposição solar em terrenos limitados.

O funcionamento dos sistemas agrivoltáicos é baseado na coexistência de duas funções principais: a produção de alimentos e a geração de energia elétrica. Os benefícios desses sistemas incluem:

- **EFICIÊNCIA DO USO DA TERRA** Ao permitir a produção simultânea de alimentos e energia, os sistemas APV aumentam a produtividade da terra maximizando o uso de recursos limitados.

→ **REDUÇÃO DO ESTRESSE HÍDRICO E TÉRMICO**

O sombreamento parcial dos painéis solares pode reduzir o estresse hídrico e térmico das plantas, ajudando a melhorar a saúde das culturas e a qualidade dos produtos agrícolas.

→ **GERAÇÃO DE RENDA ADICIONAL** A produção de energia solar pode fornecer uma fonte adicional de renda para os agricultores,

diversificando suas receitas e tornando a prática agrícola mais econômica.

→ **SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL** Os sistemas APV contribuem para a redução das emissões de gases de efeito estufa e a promoção de práticas agrícolas sustentáveis, ajudando a mitigar os impactos das mudanças climáticas.

FIGURA 10.17 Sistema agrivoltaico instalado em cultivo



Fonte: AGRI-VOLTAICS 2022. AgriVoltaics 2022 Conference Catalog, apresentado pelo Incaper.

Apesar dos numerosos benefícios, a implementação de sistemas agrivoltaicos enfrenta vários desafios:

→ **CUSTOS INICIAIS** A instalação de sistemas APV pode ter altos custos iniciais, incluindo a compra de painéis solares, estruturas de suporte e sistemas de irrigação. No entanto, esses custos podem ser compensados ao longo do tempo com a geração de energia e a melhora na produtividade agrícola.

→ **DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO** A tecnologia para montagem e integração de sistemas APV está em constante desenvolvimento. Melhorias contínuas são necessárias para otimizar o desempenho e reduzir custos.

→ **ACEITAÇÃO E ADAPTAÇÃO** A aceitação por parte dos agricultores e a adaptação às novas práticas podem ser um desafio. É crucial fornecer suporte técnico e financeiro para a implementação bem-sucedida.

As perspectivas para os sistemas agrivoltaicos são bastante promissoras. O avanço das tecnologias solares e o aumento do interesse em práticas agrícolas sustentáveis estão impulsionando o crescimento desses sistemas. As áreas de pesquisa e desenvolvimento estão focadas em:

→ **OTIMIZAÇÃO DO DESIGN** Melhorar as configurações dos sistemas para maximizar a eficiência da geração de energia e a produtividade das culturas.

→ **POLÍTICAS DE INCENTIVO** Desenvolver políticas públicas e incentivos financeiros que possam apoiar a adoção em larga escala dos sistemas agrivoltaicos.

→ **INTEGRAÇÃO COM OUTRAS TECNOLOGIAS** Explorar a integração com outras tecnologias sustentáveis, como a captura e reutilização de água para criar soluções mais completas e eficazes.

Os sistemas agrivoltaicos oferecem uma abordagem inovadora e sustentável para enfrentar os desafios da agricultura moderna, promovendo uma coexistência eficiente entre a produção de alimentos e a geração de energia. Por meio da combinação de tecnologias e práticas agrícolas, esses sistemas têm o potencial de contribuir significativamente para um futuro mais sustentável e resiliente.

Os sistemas agrivoltaicos surgem também como uma solução inovadora para enfrentar a crescente demanda por alimentos e energia renovável, ao integrar a produção agrícola e a pecuária com a geração de energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos. Esse conceito visa otimizar o uso da terra, permitindo a coexistência de cultivos e geração de eletricidade, e oferece

uma abordagem multifuncional que pode maximizar a eficiência de recursos limitados.

A ideia central dos sistemas agrivoltaicos é utilizar o mesmo espaço para cultivar plantas e outros seres vivos e instalar painéis solares, criando um ambiente onde ambos podem prosperar simultaneamente. Os painéis solares são montados sobre estruturas elevadas ou posicionados em arranjos que permitem a passagem de luz suficiente para as culturas. Dessa forma, a produção de alimentos e a geração de energia não apenas compartilham a mesma área, mas também se beneficiam mutuamente. O sombreamento proporcionado pelos painéis pode reduzir o estresse térmico e hídrico das plantas, melhorando a saúde e a produtividade das culturas.

Os sistemas agrivoltaicos podem ser configurados de diferentes maneiras, dependendo das necessidades específicas de cultivo e da eficiência desejada na geração de energia. As principais configurações incluem painéis montados no solo, ligeiramente elevados, totalmente elevados e sistemas montados verticalmente. Cada arranjo tem suas vantagens e é escolhido com base nas características do local e nas culturas a serem cultivadas.

FIGURA 10.18 Sistema agrivoltaico instalado em substituição a estufa do morangueiro 1



Fonte: AgriVoltaics 2022 Conference Catalog, apresentado pelo Incaper.

A metodologia para avaliar a viabilidade desses sistemas geralmente envolve modelos matemáticos e simulações, bem como experimentos de campo para validar teorias com dados empíricos. Esses estudos consideram fatores como a orientação dos painéis solares, os tipos de culturas, a densidade de plantio e as condições climáticas. A análise também inclui a avaliação dos custos envolvidos, tanto para a instalação dos painéis quanto para a produção agrícola, e examina os benefícios econômicos e ambientais potenciais.

Os benefícios dos sistemas agrivoltaicos são evidentes. A combinação de produção agrícola e geração de energia pode aumentar a eficiência do uso da terra em até 70% em comparação com sistemas convencionais que utilizam a terra apenas para uma das atividades. Além de promover um uso mais sustentável dos recursos,

esses sistemas podem oferecer uma fonte adicional de renda para os agricultores por meio da venda de eletricidade gerada. Outra vantagem está no sombreamento moderado dos painéis, que pode melhorar a qualidade das frutas e reduzir o estresse hídrico das plantas, levando a um aumento na produtividade e na qualidade dos produtos agrícolas.

Apesar dos benefícios, a implementação de sistemas agrivoltaicos enfrenta desafios. Os custos iniciais para a instalação das infraestruturas podem ser elevados, e há uma necessidade de desenvolvimento de tecnologias adequadas para gerenciar eficientemente as operações combinadas. A aceitação social e a adaptação dos agricultores às novas tecnologias também são fatores importantes que podem influenciar o sucesso desses sistemas.

FIGURA 10.19 Sistema agrivoltaico instalado em substituição a estufa do morangueiro 2



Fonte: AgriVoltaics 2022 Conference Catalog, apresentado pelo Incaper.

FIGURA 10.20 Sistema agrivoltaico instalado em substituição a estufa do morangueiro 3



Fonte: *AgriVoltaics 2022 Conference Catalog*, apresentado pelo Incaper.

As perspectivas para os sistemas agrivoltaicos são promissoras. Com o avanço das tecnologias e a redução dos custos dos painéis solares, a adoção desses sistemas tende a aumentar. Políticas de incentivo e financiamento, bem como mais pesquisas e desenvolvimento são recomendados para explorar completamente o potencial dos sistemas agrivoltaicos e facilitar sua implementação em larga escala.

Além de melhorar a eficiência do uso da terra, os sistemas agrivoltaicos também oferecem uma solução para proteger as culturas contra os impactos das mudanças climáticas. A instalação de painéis fotovoltaicos pode ajudar a reduzir o estresse térmico e hídrico nas plantas, contribuindo

para a produção agrícola sustentável. O aumento da qualidade dos frutos e a redução dos impactos adversos das condições climáticas extremas são alguns dos benefícios observados.

Em resumo, os sistemas agrivoltaicos representam uma alternativa inovadora e sustentável para otimizar a produção agrícola e a geração de energia. Eles oferecem uma abordagem multifuncional que pode melhorar a eficiência dos recursos naturais, aumentar a renda dos agricultores e contribuir para a sustentabilidade ambiental. A integração dessas tecnologias na agricultura moderna pode ser uma chave para enfrentar os desafios atuais e futuros relacionados à segurança alimentar e energética.

10.3.6 Usinas solares em estacionamentos e para a iluminação pública

USINA SOLAR FOTOVOLTAICA EM ESTACIONAMENTOS

A Universidade Federal do Paraná (UFPR), em Curitiba, inaugurou em janeiro de 2020 a maior usina solar fotovoltaica construída em estacionamento (carport)^[102] do Brasil. Espera-se com o sistema uma economia de até R\$ 1,5 milhão por ano em energia elétrica, o que representa 50% do consumo atual do Campus Politécnico e é suficiente para abastecer 722 residências.

O projeto faz parte do Programa de Eficiência Energética da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), com participação da UFPR. A iniciativa busca promover projetos que fazem uso eficiente de energia elétrica. A usina contou com um investimento de R\$ 5 milhões em sua construção.

O complexo solar da UFPR tem capacidade para gerar 1.299,715 MWh por ano. Quase 3 mil módulos de placas solares cobrem 375 vagas no estacionamento, cuja área é em torno de 10 mil metros.

Aplicou-se o uso de um sistema “dois por um”, quando faz-se o uso de um estacionamento

coberto, mas, em vez de telhas, são usados os próprios módulos como cobertura.

FIGURA 10.21 Usina solar fotovoltaica no estacionamento da UFPR, Curitiba, PR



Fonte: epocanegocios.globo.com^[102], Foto Divulgação. Usina vai permitir a economia de até R\$ 1,5 milhão por ano em energia elétrica. Operação em 2020.

USINA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA A ILUMINAÇÃO PÚBLICA

A Prefeitura de Curitiba vem realizando testes de um sistema de captação de energia solar, instalado na iluminação pública do Parque Barigui. Sendo aprovado, o sistema será ampliado para os postes restantes.

FIGURA 10.22 Energia Solar na Iluminação Pública, no Parque Barigui, Curitiba, PR



Fonte: Atlas Solar do Espírito Santo, 1ª Edição.

10.4 Usinas solares nos estádios brasileiros

Alguns estádios no Brasil contam com os sistemas solares FV. O **Mineirão** foi um dos primeiros estádios brasileiros a ter instalada uma usina de energia solar. A energia gerada tem o potencial para abastecer até 900 residências. Do total de uma potência instalada de de 1,42 MWp, somente 10% da energia produzida será consumida no próprio estádio, sendo todo o restante comercializado e distribuído pela rede da Cemig, estatal responsável pelo abastecimento em Minas Gerais, que agora conta com uma substação no estádio ^{[65][67]}.

O Estádio Nacional de Brasília, conhecido como **Mané Garrincha**, foi construído com a função de ser uma arena sustentável. Entre as várias ações com este objetivo está a usina solar no anel de compressão da cobertura, com capacidade de gerar até 2,5 megawatts

de energia, numa área de 15 mil m², sobre 75% da cobertura.

Também está sendo projetado o uso de energia solar no Estádio Governador Plácido Castelo, mais conhecido como **Arena Castelão**, localizado em Fortaleza, Ceará. Placas fotovoltaicas na cobertura do estádio poderão gerar até 2 MW de energia elétrica. Já a **Arena Pernambuco** recebeu em 2013 3.652 painéis solares fotovoltaicos, com potência instalada de 1 megawatt pico (MW/p) e capacidade suficiente para gerar 1.500 MW/h por ano.

Localizado no Rio de Janeiro, o estádio Jornalista Mário Filho, conhecido como **Maracanã**, recebeu em 2014 um sistema com 1.552 módulos solares, que cobrem uma área de 2.380 m² e são capazes de gerar 500 MWh por ano. A energia gerada no Maracanã é comercializada pela Light, que assumiu o gerenciamento e a manutenção do sistema.

FIGURA 10.23 Usinas FV no Mineirão, Mané Garrincha, Arena Pernambuco e Maracanã



Fontes, da esquerda para a direita: Farol do Brasil 2020, Foto: Revista Infra. Minha Casa Solar 2018, Foto: do site. Jornal do Comercio, 2015, Foto: Eudes Santana. Canal solar 2021, foto de divulgação.

10.5 As usinas solares no Estado do Espírito Santo

Atualmente, no Espírito Santo, a energia solar é aproveitada tanto por usinas solares fotovoltaicas geradoras de energia elétrica quanto por coletores solares térmicos para o aquecimento da água. Ambos os sistemas podem ser instalados em residências, indústrias, hotéis e estabelecimentos comerciais que necessitam de água aquecida e energia elétrica, proporcionando, assim, a autonomia energética a cada um.

No Espírito Santo, os primeiros bairros a utilizarem energia solar em grande escala foram Serra Dourada I, II e III, no município de Serra. O projeto é um dos maiores com este tipo de sistema no Brasil. Nesses bairros, 2.062 residências receberam o projeto Boa Energia Solar, iniciativa inédita

da concessionária de energia elétrica do Estado em parceria com a Agência de Serviços Públicos de Energia do Espírito Santo (Aspe – atual ARSP), que consiste basicamente na instalação de um sistema aquecedor de água solar nas residências para aquecimento de água.

As casas receberam gratuitamente a instalação do aquecedor de água solar para o aquecimento da água, reservatório térmico para armazenamento e misturadores de água quente e fria para regular a temperatura até que a água fique agradável ao banho, além de orientações de técnicos capacitados sobre a perfeita utilização dos equipamentos. A média nacional de economia das casas com painéis solares térmicos é de aproximadamente 30%.

FIGURA 10.24 Bairro Solar: Serra Dourada, Serra, ES e Aquecedor Solar (reservatório e placa)



Além da implementação do programa nos bairros de Serra Dourada, a distribuidora de energia elétrica ampliou o projeto para 218 residências em Eldorado. Já em Cariacica, 193 dos 240 apartamentos de um conjunto habitacional com 15 prédios no bairro Itanguá e 79 casas do Bairro Prolar também estão com as instalações. No município de Vila Velha, o bairro Jabaeté recebeu 566 painéis e Santa Paula 281 painéis de aquecedores solares.

Ao todo, o investimento realizado pela concessionária foi de R\$ 17 milhões para contemplar 4.240 residências na Região Metropolitana da Grande Vitória. A implantação do Bairro Solar consiste no Programa de Eficiência Energética das Empresas de Distribuição (PEE), determinado pela Aneel.

O município de Castelo, no Sul do Estado, também está contemplado com o projeto Bairro

Solar. A iniciativa vem beneficiar, inicialmente, 112 casas do conjunto residencial que está sendo construído no bairro Cava Roxa.

USINAS FOTOVOLTAICAS NO ESPÍRITO SANTO POR GERAÇÃO DISTRIBUÍDA, REGISTRO E OUTORGA

Em janeiro de 2024, o Estado do Espírito Santo totalizou 14 usinas FV por meio de outorga ou registro na Aneel, atingindo 7,7MWp de potência instalada, e 45.814 usinas FVs por meio de Geração Distribuída (GD), com 581MWp de potência, atendendo a cada classe consumidora: residencial, rural, comercial, industrial e poder público. A seguir são apresentados alguns projetos.

FIGURA 10.25 Usina Fotovoltaicas na Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes), Campus Goiabeiras, Vitória



Foto: UFES, divulgação, março de 2020.

A Ufes instalou usinas em março de 2020 nos campus de Maruípe e Goiabeiras, com potência instalada de 441kWp e 5MWp, respectivamente, reduzindo em 45,5% o consumo do campus de Goiabeiras e em 30% a conta geral da Universidade.

USINAS FV PELO GOVERNO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO

Um projeto público como referencial inicial realizado no Espírito Santo, inaugurado em 2013,

foi o de **Geração Distribuída Fotovoltaica na Residência Oficial do Governador (Resof)**. Foi instalada uma central fotovoltaica com potência de 2.5 kWp, composta por 11 placas FV de 235 Wp de potência cada, em uma área de 18 m².

Por meio da Secretaria de Estado da Educação (Sedu), o Governo do Estado investiu R\$ 16 milhões em usinas fotovoltaicas em escolas da Rede Estadual. Até a conclusão do projeto, com as 70 escolas contempladas, alcançará uma potência instalada somada de 3,8MWp.

FIGURA 10.26 Usinas públicas na Residência Oficial Governador Espírito Santo e na EEEFM Conceição Silva



Fontes: Esq.: Atlas Solar do Espírito Santo, 1ª Edição. Dir.: Escola EEEFM Conceição da Silva, site Governo ES, 2021.

Atualmente, o Governo do Espírito Santo instituiu um Grupo de Trabalho para estudar a implantação de sistemas solares, por meio de Parceira Público-Privada (PPP), com o objetivo

de gerar energia elétrica para atender o consumo das instituições do Poder Executivo Estadual. Consulta Pública feita pela Seger nº 001/2022 – TR Miniúsinas FV.

USINAS PRIVADAS, RESIDENCIAIS, RURAIS E COMERCIAIS

FIGURA 10.27 Usinas fotovoltaicas residenciais e comerciais no Espírito Santo



Figura A) Residência com sistema fotovoltaico no Espírito Santo. Cortesia, Grupo Pro-Energia Solar – ES.

Figura B) Usina Morro do Chapéu – Domingos Martins – Sítio do Sr. Adilson.

Figura C) Usina Residência André Soares – Alphaville Jacuhy – Serra.

Figura D) Usina Mecânica Kiefer em Santa Maria de Jetibá. Cortesia ESSolaris.

USINA PARA PESQUISA EM ENERGIA FOTOVOLTAICA

O Governo do Estado inaugurou, em março de 2021, a primeira Usina para Pesquisa de Energia Fotovoltaica do Espírito Santo. A usina é coordenada pela Secretaria de Estado da Ciência, Tecnologia, Inovação e Desenvolvimento (Sedes), por meio da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (Fapes).

Localizada no Centro de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento (CPID), em Cariacica, será um grande laboratório de energia solar, pois a tecnologia instalada permite monitorar os módulos fotovoltaicos individualmente. O empreendimento foi projetado e instalado para tornar o prédio do CPID, que tem uma área construída de 3.664 metros quadrados, em um

terreno de 16.442 metros quadrados, autossuficiente no consumo de energia elétrica.

O valor investido na Usina para Pesquisa de Energia Fotovoltaica foi de R\$ 1.547.700,00. O projeto consiste em dois conjuntos de módulos fotovoltaicos, sendo um instalado em toda a superfície da cobertura do CPID e o outro no estacionamento do empreendimento. Irá totalizar uma potência instalada de 279,18 kWp e gerar, em média, 35,5 MWh/mês. Para fins de comparação, essa quantidade de energia elétrica é suficiente para abastecer cerca de 250 residências.

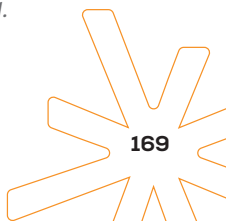
A usina solar fotovoltaica com 140,3 kWp de potência instalada no Campus Serra do Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes) iniciou sua operação em 11 de março de 2019. A iniciativa tem como foco três objetivos: reduzir despesas com custeio, divulgar a tecnologia FV e capacitar pessoas.

FIGURA 10.28 Usinas para pesquisa em energia fotovoltaica do ES, CPID e Ifes – Serra



Usina solar para geração distribuída compartilhada

Fontes:
 01 - Ref. 104: Sedes: Governo inaugura 1ª Usina para Pesquisa em Energia Fotovoltaica do Estado, 17/03/2021.
 02 - Ifes Serra, Foto painéis FV Blocos 03 e 09 e dos Inversores, para ensino, divulgação no site.



A Resolução Normativa 482/2012, com a atualização em 2015 e demais legislações em GD, recebeu a inclusão de novas modalidades de conexão: o condomínio, o consórcio e as cooperativas, como exemplo. A seguir, está um modelo de um condomínio solar.

PARQUE SOLAR SUN INVEST, LINHARES, ES

O projeto condomínio solar Sun Invest teve as obras iniciadas em 2018. O empreendimento, que será implantado em três etapas, possui uma área disponível de 50.000m² e utilizará

cerca de 3.120 placas fotovoltaicas de 330 watts em cada etapa de implantação. Para cada etapa de 1,03 MWp, estima-se a produção de 1687,6 MWh/ano a partir da luz do sol, ou seja, será capaz de suprir às necessidades de consumo de energia de quase 2.000 famílias, evitando a emissão de quase 1,8 tonelada de CO₂ por ano na atmosfera.

A Usina Solar Juparanã (USJ) tem 10,8 mil painéis fotovoltaicos bifaciais, com 7,1 MWp instalados e uma geração anual de energia na casa dos 10,4 GWh, ou 929,87 MWh por mês, o suficiente para atender cerca de 5.000 residências.

FIGURA 10.29 Parque solar fotovoltaico por geração compartilhada no Estado



Foto: Divulgação da ESSolar. Parque Solar SUN Invest, Linhares, ES. Inaugurado em 2019.

FIGURA 10.30 Usina Solar Juparanã (USJ) – Linhares



Fonte: Marca Ambiental, 2024.



CAPÍTULO

11.

Considerações
e Proposições

O desenvolvimento do Atlas Solar do Espírito Santo – Potencial, Tecnologias, Aplicações e Oportunidades, 2ª Edição, representa um marco crucial no planejamento energético do Estado, destacando a importância de integrar a energia solar ao plano energético estadual e nacional. Em um cenário global em que a energia solar está em forte expansão, torna-se essencial que esse planejamento seja fruto de um esforço conjunto entre setores público, privado e entidades de classe, e indivíduos envolvidos no processo produtivo e de consumo de energia.

O Atlas proporciona uma visão abrangente sobre o potencial da energia solar no Espírito Santo e revela a necessidade de uma abordagem estratégica para a sua integração no plano energético estadual e nacional. Apresenta uma análise sobre os principais temas abordados, considerando a infraestrutura energética do Estado, tecnologias para aproveitamento da energia solar, estimativas para projetos típicos, potencial para empreendimentos de grande porte, climatologia, impacto na agropecuária e silvicultura, mecanismos de incentivo e aplicações da energia solar, no Espírito Santo, no Brasil e no mundo.

A infraestrutura energética do Espírito Santo é um componente fundamental e crítico para o desenvolvimento e a expansão da energia solar no Estado. Atualmente, o sistema energético estadual avança sobre os desafios relacionados à capacidade de transmissão e distribuição de energia. Para maximizar o aproveitamento do potencial solar, é essencial que a infraestrutura de redes de distribuição e transmissão seja continuamente modernizada e ampliada, de modo a suportar a integração de novas fontes de geração. Investimentos em tecnologias de rede inteligente (*smart grids*) e em sistemas de armazenamento de energia também são essenciais para garantir a estabilidade e a eficiência do fornecimento de energia solar.

O avanço das tecnologias para aproveitamento da energia solar mostrou-se crucial para a viabilidade dos projetos fotovoltaicos no Espírito Santo. As tecnologias solares térmicas e fotovoltaicas oferecem soluções diversificadas para aquecimento e geração de eletricidade, sendo complementares. A escolha entre diferentes tipos de células fotovoltaicas, como o silício cristalino e os filmes finos, influencia diretamente a eficiência e o custo dos sistemas. Tecnologias emergentes, como os concentradores solares e os sistemas híbridos, também apresentam potencial significativo

para melhorar o desempenho e reduzir os custos da geração solar. O desenvolvimento contínuo de tecnologias e a redução dos custos de instalação são aspectos determinantes para a expansão da energia solar no Estado.

As estimativas para projetos típicos de energia solar no Espírito Santo mostram um potencial substancial tanto para sistemas fotovoltaicos residenciais quanto para sistemas de aquecimento. O Estado possui uma irradiância solar consistente, que favorece a implementação de sistemas solares para diversos usos, incluindo em residências, comércio, indústria, classe rural e a pública. Projetos que combinam geração fotovoltaica com aquecimento solar e bateria oferecem uma abordagem integrada para atender à demanda energética local, aumentando a eficiência e a sustentabilidade.

O Espírito Santo apresenta ainda um relevante potencial para empreendimentos de geração solar de grande porte. A análise do potencial nacional e das macrorregiões com aptidão para a geração fotovoltaica e heliotérmica mostra que o Estado, proporcionalmente, tem condições de se tornar um líder na geração solar no Brasil. Projetos de grande escala tendem a se beneficiar da disponibilidade de áreas com alta irradiância e do suporte de políticas públicas voltadas para a energia renovável. O desenvolvimento de grandes usinas solares pode não apenas atender à demanda interna, mas também contribuir para o abastecimento de outras regiões e para a redução das emissões de carbono no Estado.

A aplicação da energia solar na agropecuária e silvicultura é uma estratégia promissora para aumentar a sustentabilidade desses setores no Espírito Santo. Sistemas solares são utilizados para alimentar bombas d'água, sistemas de irrigação e outros equipamentos essenciais, reduzindo os custos operacionais e melhorando a eficiência energética. A integração da energia solar nas práticas agrícolas e florestais também promove para a redução da pegada de carbono e uma gestão ambiental mais responsável.

Os mecanismos de incentivo, tanto federais quanto estaduais, desempenham um relevante papel no fomento à energia solar. A implementação de políticas de incentivo, como subsídios, isenções fiscais e financiamentos direcionados, acelera a adoção de tecnologias solares. No Espírito Santo, é necessário um maior engajamento na divulgação e no aprimoramento dessas políticas para garantir que mais usuários se beneficiem das oportunidades

ofertadas. A criação de mecanismos específicos, como linhas de crédito no Bandes e Banestes, pode facilitar a expansão da energia solar.

Embora a mão de obra tenha se tornado mais especializada em projetos de aproveitamento da energia solar, ainda é necessário incentivar a capacitação de profissionais para projetar, instalar e dar manutenção a esses sistemas, incluindo integradores, projetistas, instaladores, empreendedores e equipes.

Para maximizar o potencial solar do Estado, propomos as seguintes ações:

- Identificar locais propícios para geração híbrida (hídrica, eólica, bioenergia e solar) com armazenamento em baterias.
- Desenvolver linhas de financiamento federal e estaduais (Bandes e Banestes) para energia solar, outras renováveis, eficiência energética e mobilidade eletrificada.

A experiência global com usinas solares, tanto de grande porte quanto em sistemas menores, oferece valiosos *insights* (percepções) para o desenvolvimento da energia solar no Espírito Santo. No Brasil, usinas solares fotovoltaicas, sistemas por aquecimento e em breve por concentração solar têm mostrado viabilidade com seus benefícios econômicos.

No cenário internacional, exemplos de sucesso, como as usinas de concentração solar em Abu Dhabi e na Califórnia, ilustram o potencial da tecnologia para atender a grandes demandas de energia. A adoção de melhores práticas e tecnologias comprovadas pode guiar o desenvolvimento de projetos solares no Espírito Santo e garantir que o Estado aproveite ao máximo suas oportunidades solares.

Por meio deste estudo, foi constatado que o Estado apresenta pouca variação no nível de radiação em seu território, tendo a irradiação global horizontal diária, média anual, variando entre 4,46 e 5,24 kWh/m²/dia. A irradiação no plano inclinado diária, média anual, no intervalo de 4,64 a 5,40 kWh/m².dia. A variação no nível de radiação no Espírito Santo é bem menor do que a encontrada nacionalmente, que está entre 4,25 kWh/m²/dia (Santa Catarina) e 6,5 kWh/m²/dia (Bahia). Esses resultados indicam a possibilidade de melhor aproveitamento do potencial solar do Estado, seja para aquecimento ou geração de energia elétrica.

Verifica-se um potencial natural médio no ano de 9,57 TW (Terawatts = 1.000 Gigawatts), ou

9.570 GW, disponibilizando uma energia de 82.712 TWh/ano. Isso significa disponibilizar uma potência física, por exemplo, em 0,01% do território (devido a restrições físicas de território, por reservas indígenas, quilombolas, preservação permanente, terras agricultáveis, entre outras), de 0,96 GWp (Gigawatts), disponibilizando energia potencial de 8.271 GWh/ano. Comparando, a potência instalada no Espírito Santo é da ordem de 2,0 GW em 2023.

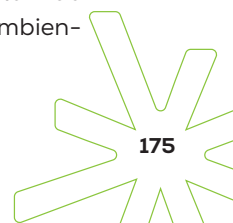
Com foco nas faixas acima de 5,0 (kWh/m².dia), usando 0,01% do território como referência, tem-se uma potência natural de 0,2GWp, com fornecimento de 1.716 GWh/ano de energia potencial, concentradas ao longo do litoral e proximidades, e em muitos setores no interior do Estado.

A Resolução Normativa nº 482 da Aneel, de 2012, e atualizações, com destaque para o marco legal; a Lei 14.300, de 06 de janeiro de 2022 e sua regulamentação; e a Resolução Normativa nº 1.059, de 07 de fevereiro de 2023, da Aneel trouxeram uma importante oportunidade para geração de energia elétrica no País: a geração distribuída, até 5 MW, por meio do mecanismo de compensação e da simplificação do processo para se tornar gerador-consumidor, o prosumidor. A legislação permite a instalação de usina solar fotovoltaica integrada à rede (*on-grid*) em residências, comércio, indústrias, setor público e no meio rural. No entanto, esse legado necessita de mais publicidade e avanços regulamentares para ser mais bem compreendido e usufruído pelos usuários de energia elétrica no Estado e nas Unidades Federativas vizinhas.

Além da geração *on-grid*, é possível explorar também a geração isolada (*off-grid*) em residências, agricultura, iluminação pública e outros sistemas que não têm acesso ou necessidade de ligação à rede. Seja só o sistema simples, com o gerador, ou o híbrido com geração e armazenamento, propiciado pela Lei 14.300/2022.

Quanto ao crescimento do mercado livre, mais usinas solares centralizadas serão demandadas no Espírito Santo, com oportunidades para grandes empreendimentos solares e híbridos com armazenamento e as demais fontes renováveis locais.

Espera-se que este estudo contribua para que a energia solar no Espírito Santo seja melhor aproveitada, trazendo mais conforto à população capixaba, aumentando o número de postos de trabalho e renda, na cidade e no campo, além de promover desenvolvimento sustentável, ambiental, social e governamental.



REFERÊNCIAS

- [1] PEREIRA, E. B. et Al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE, 60 p. 2006. Acesso em: 18 fev. 2012.
- [2] GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Energia Solar Paulista: Levantamento do Potencial**. São Paulo. 2013. Disponível em: <http://www.energia.sp.gov.br/a2sitebox/arquivos/documentos/455.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2013 e 18 fev. 2020.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA (ABINEE). **Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira**. 2012. Disponível em: <http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/profotov.Pdf>. Acesso em: 10 mai. 2013 e 18 fev. 2020 (Link indisponível).
- [4] AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). **Tracking Clear Energy Progeress 2013: IEA Imput to the Clean Energy Ministerial**. Paris, 2013. Disponível em: http://www.iea.org/publications/TCEP_web.pdf. Acesso em: 7 mai. 2013 (Link indisponível).
- [5] AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). **World Energy Outlook 2012 - Sumário**. Paris, 2012.
- [6] AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). **A Snapshot of Global PV1992-2012**. Preliminary information from the IEA PVPS Programme. Report IEA-PVPS T1-22. 2013.
- [7] COLLE, S; PEREIRA, E. B. **Atlas de Radiação Solar do Brasil**. Brasília: INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, 1998. 57 p. Disponível em: http://www.lepten.ufsc.br/pesquisa/solar/atlas_de_irradiacao.pdf. Acesso em: 20 mai. 2013.
- [8] TIBA, C. ET AL. **Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados Solarimétrico**. Recife. Ed. Universitária da UFPE. 2000. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf. Acesso em: 20 mai. 2013.
- [9] COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS (CEMIG). **Atlas Solarimétrico de Minas Gerais**. Governo de Minas: Belo Horizonte. 80 p. 2012. Disponível em: <http://www.atlassolarimetricomg.com.br/>. Acesso em: 20 mai. 2013.
- [10] ELETROBRAS. **Atlas Solarimétrico de Alagoas**. UFPE. UFAL. Alagoas, 2008. Disponível em: <http://www.seplande.al.gov.br/energia-e-recursos-minerais/recursos-energeticos/atlassolarimetrico-de-alagoas>. Acesso em: 20 mai. 2013.

- [11] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>. Acesso em 20 mai. 2013.
- [12] SOARES, E. **O que falta para sair do atraso?** Revista Brasil Energia. Ano 32, nº 389, abril 2013. Acesso em: 20 mai. 2013.
- [13] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Banco de Informações de Geração (BIG)**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=15>. Acesso em: 20 mai. 2013.
- [14] AGÊNCIA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE ENERGIA DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO (ASPE). **Importância da Elaboração de um Atlas do Potencial Solar Estadual** – Estudo para o Espírito Santo. VIII Congresso ABAR 2013. Ceará, 2013.
- [15] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília, MME: EPE, 2007.
- [16] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Nota Técnica EPE: Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**. Rio de Janeiro. 2012. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/geracao/Paginas/TécnicaAnálisedaInserçãodaGeraçãoSolarnaMatrizElétricaBrasileira.aspx>. Acesso em: 13 mar. 2013.
- [17] MARTINS, F. R; PEREIRA, E. B. **Estudo comparativo da confiabilidade de estimativas de irradiação solar para o Sudeste brasileiro obtidas a partir de dados de satélite e por interpolação/extrapolação de dados de superfície**. Revista Brasileira de Geofísica. pg. 265–276, vol. 29(2), Rio de Janeiro, 2011.
- [18] OPEN ENERGY INFO. **Brazil Direct Normal Solar Radiation Model (10km) from INPE and LABSOLAR**. Santa Catarina, 2009. Disponível em: <http://en.openei.org/datasets/node/547>. Acesso em: 11 mar. 2013.
- [19] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional – BEN 2012**. Rio de Janeiro, MME: EPE. 2012.
- [20] GAMBI, W. **Avaliação de um modelo físico estimador de irradiância solar baseado em satélites geoestacionários**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1998.
- [21] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2012**. Rio de Janeiro, MME: EPE. 2012.
- [22] SECRETARIA DE ESTADO DA FAZENDA DO ESPÍRITO SANTO (SEFAZ-ES). **Legislação Online**. 2013. Disponível em: <http://www.sefaz.es.gov.br/LegislacaoOnline/lpext.dll?f=-templates&fn=main-h.htm&2.0>. Acesso em: 7 mai. 2013.
- [23] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 77. 18 de agosto, 2004**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2004077.pdf>. Acesso em: 7 mai. 2013.
- [24] CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (CNDI). **Plano Brasil Maior: Agendas Estratégicas Setoriais. Brasília, abril de 2013**. Disponível em: <http://www.brasilmaior.mdic.gov.br/images/data/201304/d874d3cddb3a7e5d-9cf32a28a3b083b0.pdf>. Acesso em: 8 mai. 2013.
- [25] BNDES. **Programas e Fundos/Mecanismos de Apoio**. 2013. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br>. Acesso em: 7 mai. 2013.
- [26] BANDES. **CARTÃO BANDES**. Disponível em: <https://www.cartaobndes.gov.br>. Acesso em: 7 mai. 2013.
- [27] BANDES. **Pronaf Eco**. 2013. Disponível em: <http://www.bandes.com.br/Site/linhas/show?id=11&idLinha=5>. Acesso em: 7 mai. 2013.

- [28] INSTITUTO IDEAL. **Diretrizes do Fundo Solar: Apoio à microgeração fotovoltaica.** Maio, 2013. Disponível em: http://www.americadosol.org/wp-content/uploads/2013/05/Diretrizes_Fundo_Solar.pdf. Acesso em: 15 mai. 2013.
- [29] RECEITA FEDERAL. **Tabela de Incidência do Imposto sobre Produtos Industrializados (TIPI).** 2012. Disponível em: www.receita.fazenda.gov.br/publico/tipi/tipi.doc. Acesso em: 15 mai. 2013.
- [30] ALVES, L. M.; MARENGO, J.A.; JUNIOR, H.C. e CASTRO, C. **Início da estação chuvosa na região Sudeste do Brasil: Parte 1 - Estudos Observacionais.** Revista Brasileira de Meteorologia. v.20, n.3, p. 385 - 394, 2005.
- [31] BROWN, E. and ELLIOTT, N. **On-Farm Energy Use Characterizations.** Report Number IE052. American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE), 2005.
- [32] CAMPOS A.T., CAMPOS A.T. **Balancos energéticos agropecuários: uma importante ferramenta como indicativo de sustentabilidade de agroecossistemas.** Ciência Rural, Santa Maria - RS, v.34, n.6, p.1977-1985, nov-dez, 2004.
- [33] CARVALHO, J. F. de. **"Fotossíntese e energias renováveis"**. Palestra apresentada no ciclo "Uma visão contemporânea do conceito de energia e suas aplicações", promovido pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Física (CBPF), na semana Nacional de Ciência e Tecnologia, 2004.
- [34] CHIKAIRE, J.; NNADI, F.N.; NWAKWASI, R.N.; ANYOHA, N.O.; AJA O.O.; ONOH, P.A. and NWACHUKWU C.A. **SOLAR ENERGY APPLICATIONS FOR AGRICULTURE.** Journal of Agricultural and Veterinary Sciences. V. 2, p. 58-62.
- [35] COMITRE, V. **Avaliação energética e aspectos econômicos da filière soja na região de Ribeirão Preto - SP.** 1993. 152f. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola/Planejamento Agropecuário) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas. 1993.
- [36] EREC. **Agricultural Applications of Solar Energy.** 2003. Energy Efficiency and Renewable Energy Cleaning house (EREC). United State Department of Energy, Merri-field. Disponível em <http://infohouse.p2ric.org/ref/24/23989.htm>. Acesso em: 21 mai. 2013.
- [37] NÃÃS, I.A. **Princípios de conforto térmico na produção animal.** São Paulo: Ícone, 1989. 183p.
- [38] FEITOZA, L. R.; SCÁRDUA, J. A.; SEDIYAMA G. C.; VALLE, S. S. **Estimativas das temperaturas médias das máximas mensais e anual do Estado do Espírito Santo.** Rev. Centro de Rurais, 10 (1): 25-32, 1980.
- [39] NÓBREGA, N. E. F.; SILVA, J. G. F.; RAMOS, H. E. dos A.; PAGUNG, F. S. **Análise da distribuição sazonal e espacial da precipitação no Sul do Estado do Espírito Santo.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 15, 2008, São Paulo. Anais..., São Paulo: SBMET, 2008b.
- [40] NÓBREGA, N. E. F.; SILVA, J. G. F.; Ramos, H. E. dos A.; PAGUNG, F. S. **Análise da distribuição sazonal e espacial da precipitação no norte do Estado do Espírito Santo.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 15, 2008, São Paulo. Anais..., São Paulo: SBMET, 2008a.
- [41] NUNES, L. H.; VICENTE, A. K.; CANDIDO, D. H. **Clima da região Sudeste do Brasil.** In: Cavalcanti, I.F.A. et al. Tempo e Clima no Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 463p.
- [42] NYSERDA. **Introduction to Solar Energy Applications For Agriculture.** 2009. New York State Energy Research Development Authority, New York.
- [43] PEREIRA, E.B.; MARTINS, F.R.; ABREU, S.L. e RÜTHER, R. 2006. **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. São José dos Campos, 66 pp.

- [44] REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 188p.
- [45] SENTELHAS, P.C., MONTEIRO, J.E.B de A. **Agrometeorologia dos Cultivos: Informações para uma Agricultura Sustentável**. In: **Monteiro, J.E.B de A. Agrometeorologia dos Cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília - DF: INMET, 1999. 530p.: il.
- [46] SVEJKOVSKY, C. 2006. **Renewable Energy Opportunities on the Farm**. AT-TRO-National Sustainable Agriculture Information Service, U.S.A.
- [47] ULIANA, E.M.; FERREIRA DA SILVA, J.G. e PIMASSONI, L.H.S. 2010. **PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE CHUVA NO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO**. XXXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Vitória-ES.
- [48] XIARCHOS, I.M. e VICK, B. 2011. **Solar Energy Use on Farms in the United States**. Overview and Policy Issues. Office of Energy Policy and New Uses, Office of the Chief Economist, USDA.
- [49] VEJA. **Abu Dhabi inaugura maior usina de energia solar concentrada do mundo**. Grupo Abril. Publicada em 17 de março de 2013. Disponível em: <http://veja.abril.com.br/noticia/ciencia/abu-dhabi-inaugura-maior-usina-de-energia-solar-concentrada-do-mundo>. Acesso em: 15 mai. 2013 e 14 jul. 2020.
- [50] BRIGHTSOURCE LIMITLESS. **Ivapah Project Facts**. Oakland. 2013. Disponível em: <http://www.brightsourceenergy.com/ivanpah-solar-project>. Acesso em: 21 mai. 2013 e 15 jul. 2020.
- [51] MACDONALD, B. **Large-scale “solar farm” technology**. Los Angeles Time. Los Angeles. 2012. Disponível em: <http://graphics.latimes.com/towergraphic-la-me-solar-desert-tg/>. Acesso em: 21 mai. 2013.
- [52] IVAPAH SOLAR ELECTRIC GENERATING SYSTEM. **Update from Ivapah**. News. Feb. 2013. Disponível em: <http://ivanpahsolar.com/update-from-ivanpah-february-2013>. Acesso em: 21 mai. 2013.
- [53] BRIGHTSOURCE LIMITLESS. **Palen Project Facts**. Oakland. 2013. Disponível em: <http://www.brightsourceenergy.com/palen>. Acesso em: 21 mai. 2013 e não encontrada em 15 jul. 2020.
- [54] TREEHUGGER. **World’s tallest solar tower (750 feet) to be erected in California... Twice**. 2013. Disponível em: <http://www.treehugger.com/renewable-energy/worldstallest-solar-tower-be-erected-california-twice.html>. Acesso em: 21 mai. 2013 e não encontrada em 15 jul. 2020.
- [55] DEPARTAMENTO NACIONAL DE AQUECIMENTO SOLAR (DASOL). **Dados de Mercado**. São Paulo. 2013. Disponível em: <http://www.dasolabrava.org.br/>. Acesso em: 21 mai. 2013.
- [56] ELETROBRAS PROCEL. **Energia Solar para aquecimento de água no Brasil: Contribuições da Eletrobras Procel e Parceiros**. Rio de Janeiro. 240 p. 2012.
- [57] ASSOCIAÇÃO DA INDÚSTRIA DE CO-GERAÇÃO DE ENERGIA (COGEN). **GT Cogen Solar: Inserção da Energia Solar no Brasil**. Relatório Final. São Paulo. 2012. Disponível em: http://www.cogen.com.br/content/upload/1/documentos/Solar/Solar_COGEN/Relatorio_Final_GT_COGEN_SOLAR.pdf. Acesso em: 20 mai. 2020.
- [58] ELETROBRAS ELETROSUL. **Energia Solar Fotovoltaica**. Florianópolis, Eletrobras. 2013. Disponível em: <http://www.eletrosul.gov.br/home/conteudo.php?cd=1151>. Acesso em: 21 mai. 2013.
- [59] INSTITUTO IDEAL. **Guia de Microgeradores Fotovoltaicos: Como faço para ter energia solar em minha casa?** 2013. Disponível em: <http://www.americadosol.org/guiaFV/>. Acesso em: 8 mai. 2013.
- [60] **RED DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA DE LATINOAMERICA Y EL CARIBE (REDSOLLAC)**. Parque Solar Cañada

- Honda. Disponível em: http://redsollac.org/?page_id=1740. Acesso em: 22 mai. 2013.
- [61] **ENERGÍAS SUSTENTABLES.** Parque Solar Cañada Honda. Disponível em: <http://www.360energy.com.ar/>. Acesso em: 22 mai. 2013.
- [62] **CPFL inaugura maior usina solar do Brasil em São Paulo.** 29 nov. 2012. Disponível em <https://petronoticias.com.br/cpfl-inaugura-maior-usina-solar-do-brasil-em-sao-paulo/>. Acesso 23 jul. 2020.
- [63] PORTAL DA COPA. **Estádio Nacional: em busca do certificado máximo de sustentabilidade.** 2013. Disponível em: <http://www.copa2014.gov.br/pt-br/noticia/estadio-nacional-sustentabilidade>. Acesso em: 22 mai. 2013.
- [64] PORTAL DA COPA. **Maracanã será uma pequena “usina” de energia elétrica.** 2012. Disponível em: <http://www.copa2014.gov.br/pt-br/noticia/maracana-sera-uma-pequena-usina-de-energia-eletrica>. Acesso em: 22 mai. 2013.
- [65] PROCELINFO. **Mineirão inaugura usina solar e vai usar 10% da energia total gerada.** 2013. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?ViewID=%7B-F5EAADD6-CCB0-4E29-A0C4-482D3D66BB65%7D¶ms=itemID=%7B6F06DC-13-7CF7-438F-A2B3-80259A9B49F-C%7D;&UIPartUID=%7BD90F22DB-05D-4-4644-A8F2-FAD4803C8898%7D>. Acesso em: 22 mai. 2013.
- [66] PORTAL DA COPA. **Usina solar na Arena Pernambuco terá capacidade para gerar o equivalente ao consumo de energia de 6 mil pessoas.** 2012. Disponível em: <http://www.copa2014.gov.br/pt-br/noticia/usina-solar-na-arena-pernambuco-teracapacidade-para-consumo-de-6-mil-pessoas>. Acesso em: 22 mai. 2013.
- [67] AGÊNCIA DE MINAS. **Mineirão é o primeiro estádio da Copa de 2014 a inaugurar usina solar.** 2013. Disponível em: <http://www.agenciaminas.mg.gov.br/multimedia/galerias/mineirao-e-o-primeiro-estadio-da-copa-de-2014-a-inaugurar-usina-solar/>. Acesso em: 22 mai. 2013.
- [68] ENRECH, C. et al. **Circuito dos Parques. Descubra a noite verde de Curitiba.** Curso de Especialização – Gestão Técnica Do Meio Urbano – GTU. UTC/FRA & PUC/PR. Curitiba. 2011.
- [69] AMBASCIATA D’ITALIA BRASILIA. **Ambasciata Verde – Energia e Recursos Hídricos.** Ministero Dell’Ambiente e Della tutela Del territorio e Del Mare. 2012.
- [70] BANDES. **Desenvolvimento Sustentável.** 2013. Disponível em: <http://www.bandes.com.br/Site/linhas/show?id=12&idLinha=71>. Acesso em: 3 set. 2013.
- [71] ESALQ. IDER. **Secador Solar – Manual de Construção.** Disponível em: <http://www.ider.org.br/ider/textos/Manual-Secador.pdf>. Acesso em: 30 out. 2013.
- [72] **Rastreador de Progresso de Energia Renovável,** IEA. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/renewable-energy-progress-tracker>, 9 outubro 2024. Acesso em: 02 jun. 2025.
- [73] **BP Statistical Review 2019,** published in June 2019. Statistical Review of World Energy. Disponível em: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>. Acesso em: 18 fev. 2020 e 02 jun. 2025.
- [74] **Eletricidade renovável,** AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/solar-pv-capacity-additions-actual-and-forecast-by-country-region-2015-2026>. Acesso em: 02 jun. 2025.
- [75] **World Energy Outlook, 2019.** IEA. Disponível em: http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS_T1_35_Snapshot2019-Report.pdf. Acesso em: 13 mai. 2020.

- [76] Banco de Informações de Geração (BIG), Aneel. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/siga>. Acesso em: 13 mai. 2022.
- [77] 1. PEREIRA, E. B. ET AL. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**, 2ª ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 88p.: il.. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/319305620_Atlas_Brasileiro_de_Energia_Solar_-_2_Edicao. Acesso em: 18 fev. 2020.
- [78] DASOL: **Relatório de Produção – SAS 2014**, maio de 2015. Disponível em: https://solarthermalworld.org/wp-content/uploads/2015/07/market_statistics_2014_brazil.pdf. Acesso em: 28 mai. 2025.
- [79] ABRAVA/DASOL, 2014. **Energia solar térmica**. Participação na matriz energética e contribuições socioeconômicas ao Brasil. Disponível em: <https://www.ecoa.org.br/wp-content/uploads/2015/11/energia-solar-termica-publicacao.pdf>. Acesso em: 19 mai. 2025.
- [80] **Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira**. ABINEE, junho de 2012. Disponível em: http://www.cogen.com.br/content/upload/1/documentos/Solar/Solar_COGEN/Proposta_fotovoltaic_empresas_v10.pdf. Acesso em: 19 mai. 2020.
- [81] **Como funciona o Efeito Fotovoltaico**. Vídeo, 2020. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=8Xocasea_wa. Acesso em: 21 mai. 2020.
- [82] Giacomazzi, D. S., Pompermayer, M. F.. **Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos no Brasil e possíveis efeitos no setor elétrico**. Rio de Janeiro, maio de 2018. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/8400/1/TD_2388.pdf. Acesso em: 21 mai. 2020.
- [83] EPE. **NOTA TÉCNICA PR 07/18 – Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no Horizonte 2050**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-456/NT%20PR%20007-2018%20Premissas%20e%20Custos%20Oferta%20de%20Energia%20El%C3%A9trica.pdf>. Acesso em: 22 mai. 2020.
- [84] GREENER, 2025. Link não disponível. Busca em: 08 dez. 2025.
- [85] GREENER. **Solar + Armazenamento – Aplicações no Brasil**. Disponível em: https://www.thesmartere.com/fileadmin/Intersolar-Global/Webinars/South_America/webinario_ees_South_America_Apresentacao_Solar_Armazenamento.pdf?utm_source=newsletter&utm_medium=email&utm_campaign=Webinar%3A+February_PT_Thank+You. Acesso em: 22 mai. 2020.
- [86] **GUIA DE LICENCIAMENTO AMBIENTAL DE HELIOTÉRMICAS – Subsídios para Avaliação de Impacto Ambiental**. Projeto DKTI-CSP - Energia Heliotérmica. Disponível em: <http://pnla.mma.gov.br/publicacoes-diversas?download=28:guia-de-licenciamento-ambiental-de-heliotermicas&start=20>. Acesso em: 25 mai. 2020.
- [87] GREENER. **Estudo estratégico 2024, referente ao ano 2023, Geração Distribuída – mercado fotovoltaico**, março de 2024. Disponível em: <https://www.greener.com.br/wp-content/uploads/2024/03/Estudo-GD-2024-V1.0-3.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2024.
- [88] **Informações Energéticas janeiro a março de 2024**, Aneel, elaboração pela Arsp. Disponível em: <https://arsp.es.gov.br/boletimenergetico>. Acesso em: 29 mai. 2025.
- [89] **Dados e estatísticas**, IEA, 2018. Disponível em: [https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Eergy%20consumption&indicator=Total%20final%20consumption%20\(TFC\)%20by%20source](https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Eergy%20consumption&indicator=Total%20final%20consumption%20(TFC)%20by%20source). Acesso em: 15 jun. 2020.
- [90] **Argentina abre o maior parque solar da América do Sul**, 13 de outubro de 2019. Disponível em: <https://blogs.funiber.org/pt/arquitetura-e-desenho/2019/10/13/argentina-abre-o-maior-parque-solar-da-america-do-sul>. Acesso 15 jul. 2020.

- [91] **Enel inaugura maior parque solar da América do Sul.** O Globo, Economia, 28/11/2017. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/enel-inaugura-maior-parque-solar-da-america-do-sul-22123636>. Acesso em: 16 jul. 2020.
- [92] **Maior Usina Solar do Brasil:** Detalhes e Como Funciona o Maior Projeto Solar da América Latina. 28 maio 2019. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/maior-usina-solar-do-brasil/>. Acesso em: 17 jul. 2020.
- [93] **As 6 Maiores Usinas Solares em Operação no Brasil.** 08 jan 2019. Disponível em: <https://www.celuloseonline.com.br/as-7-maiores-usinas-solares-em-operacao-no-brasil/>. Acesso em: 20 jul. 2020.
- [94] **Complexo Solar Pirapora.** Disponível em: <https://www.omegaenergia.com.br/projetos/pirapora/>. Acesso em: 20 jul. 2020.
- [95] **Parque solar Ituverava entra em operação no interior da Bahia.** Disponível em: <https://www.bahiadevalor.com.br/2017/09/parque-solar-ituverava-entra-em-operacao-no-interior-da-bahia/>. Acesso em: 20 jul. 2020.
- [96] **Enel abre parque solar de 158 MW na Bahia,** 28 de setembro de 2017. Disponível em: <https://www.enel.com.br/en-ceara/media/news/d201709-enel-opens-158-mw-solar-park-in-bahia.html>. Acesso em 20 jul. 2020.
- [97] **Complexos de energia solar são inaugurados em duas cidades do interior de SP.** Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/bauru-marilia/noticia/2019/08/15/complexos-de-energia-solar-serao-inaugurados-em-duas-cidades-do-interior-de-sp.ghtml>. Acesso em: 20 jul. 2020.
- [98] **Complexo Solar Apodi entra em operação comercial.** Disponível em: <https://www.equinor.com.br/pt/noticias/complexo-solar-apodi-entra-em-operacao-comercial.html>. Acesso em: 21 jul. 2020.
- [99] **Usina Solar Flutuante: Conheça a Tecnologia e os Projetos Instalados no Brasil.** 16 de junho de 2020. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/usina-solar-flutuante-tecnologia-e-projetos-no-brasil/>. Acesso em: 22 jul. 2020.
- [100] **Maior usina solar flutuante do mundo começa a gerar energia,** 26 maio 2017. Disponível em: <https://tecnoblog.net/215441/maior-usina-solar-flutuante/>. Acesso em: 22 jul. 2020.
- [101] **Usina Solar Flutuante produz 14% mais de energia elétrica e reduz evaporação em até 70%.** Jornal da Bioenergia 14/08/2017. Disponível em: <https://vegasolar.com.br/energia-solar/usina-solar-flutuante-produz-14-mais-de-energia-eletrica-e-reduz-evaporacao-em-ate-70/>. Acesso em: 23 jul. 2020.
- [102] **Universidade Federal do Paraná inaugura a maior usina solar do Brasil construída em estacionamento,** 24 jan. 2020. Disponível em: <https://epo-canegocios.globo.com/Tecnologia/noticia/2020/01/universidade-federal-do-parana-inaugura-maior-usina-solar-do-brasil-construida-em-estacionamento.html>. Acesso em 23 jul. 2020.
- [103] Palaoro, B. L. **Dissertação Mapa Solar Interativo: proposta de método para Vitória/ES,** 2019, CENTRO DE ARTES. PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO, UFES, 2019. Disponível em: http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese_13521_LOHANE%20PALAORO%20-%20VERS%C3%20FINAL.pdf. Acesso em jul. 2020.
- [104] **Governo inaugura primeira Usina para Pesquisa de Energia Fotovoltaica do Estado.** Governo do Estado do Espírito Santo. Site. 17/03/2021. <https://www.es.gov.br/Noticia/governo-inaugura-primeira-usina-para-pesquisa-de-energia-fotovoltaica-do-estado>. Acesso em: 18 mar. 2021.

- [105] **Neutrino Energy Group**, site. Disponível em: <https://neutrino-energy.com/>. Acesso em: 29 jun. 2021.
- [106] **Código autorial**. A21a. Disponível em: <https://www.cuttersonline.com.br/registro/1edc1c38-a7fa-6c20-81b-1-fae9a81e910b>. Acesso em: 29 jun. 2021.
- [107] **AGRI-VOLTAICS 2022**. AgriVoltaics 2022 Conference Catalog. Disponível em: https://www.agrivoltaics-conference.org/fileadmin/data/AgriVoltaics/2022/AgriVoltaics2022_Conference_Catalog.pdf. Acesso em: 26 ago. 2024.
- [108] Amaducci, S., Yin, X., & Colauzzi, M. (2018). **Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production**. *Applied Energy*, 220, 545–561. doi:10.1016/j.apenergy.2018.03.081.
- [109] CRITÉRIA ENERGIA SOLAR. **Soluções inovadoras para energia sustentável**. Disponível em: <https://www.criteriaenergiasolar.com/solucoes>. Acesso em: 26 jul. 2024.
- [110] Dinesh, H., & Pearce, J. M. (2016). **The potential of agrivoltaic systems**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 299–308. doi: 10.1016/j.rser.2015.10.024.
- [111] ScienceDirect - **Driving and restraining forces for the implementation of the Agrophotovoltaics system technology**. Sites. Disponível em: Publikationen in KITopen e AgriSolar Clearinghouse. Acesso em: 29 mai. 2025.
- [112] INCAPER. **Atlas Climatológico do Espírito Santo. 2024**. Disponível em: https://meteorologia.incaper.es.gov.br/atlas_clima_es. Acesso em: 05 jun. 2024.
- [113] INSTITUTO JONES DOS SANTOS NEVES. **Base de dados gerados e utilizados no Atlas Climatológico**. Disponível em: <https://ide.geobases.es.gov.br/maps/1325>. Acesso em: 05 jun. 2024.
- [114] Juillion, P., Lopez, G., Fumey, D. et al. **Combining field experiments under an agrivoltaic system and a kinetic fruit model to understand the impact of shading on apple carbohydrate metabolism and quality**. *Agroforest Syst* (2024). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10457-024-00965-0>. Acesso em: 05 jun. 2024.
- [115] P., Sujithkumar & PI, Poornima. (2024). **Agrivoltaic system - A climate Resilient Agriculture Strategy**. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/378395838_Agrivoltaic_system_-_A_climate_Resilient_Agriculture_Strategy. Acesso em 05 jun. 2024.
- [116] Sarr, A.; Soro, Y.M.; Tossa, A.K.; Diop, L. **Agrivoltaic, a Synergistic Co-Location of Agricultural and Energy Production in Perpetual Mutation: A Comprehensive Review**. *Processes* 2023, 11, 948. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr11030948>. Acesso em 05 jun. 2024.
- [117] Associação Brasileira de Energia Solar Térmica (Abrasol). **Produção e Venda de Sistemas de Aquecimento Solar 2024 – Base 2023**. Disponível em: <https://abrasol.org.br/wp-content/uploads/2024/04/Pesquisa-de-Producao-e-Vendas-de-2024-ano-base-2023.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2025.
- [118] MORALES, L. R. Valer. **A utilização de sistemas fotovoltaicos de bombeamento para irrigação em pequenas propriedades rurais**. Dissertação. USP, São Paulo/SP, 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/301354867_A_UTILIZACAO_DE_SISTEMAS_FOTOVOLTAICOS_DE_BOMBEAMENTO_PARA_IRRIGACAO_EM_PEQUENAS_PROPRIEDADES_RURAI. Acesso em: 08 dez. 2025.

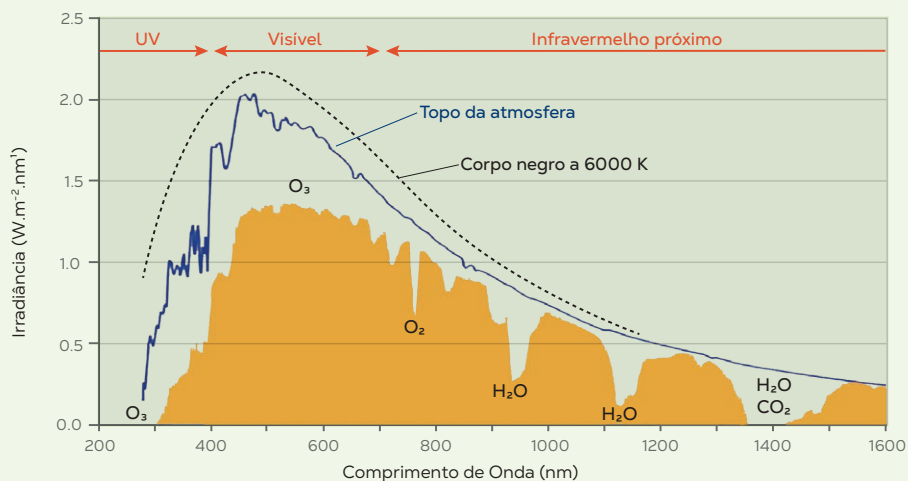
APÊNDICE A

O espectro da irradiação solar

A.1 – Irradiação solar fotovoltaica

Análise para estimar quanto da radiação fotovoltaica que atinge a camada superior da atmosfera chega à superfície. A figura a seguir mostra esta proporção para cada comprimento de onda – supondo que o sol está “a pino” e que não há nuvens.

GRÁFICO A.1 Espectro eletromagnético da radiação solar



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2ª Edição, 2017.

OBS.: A área entre as curvas representa a atenuação da radiação solar incidente durante sua passagem através da atmosfera. Para comparação, é apresentada uma curva de emissão de um corpo negro a 6000 K (linha tracejada).

Observa-se inicialmente que cerca de metade da radiação está na faixa de comprimento de onda conhecida como luz visível. Isto não é coincidência, e sim causa do processo evolutivo dos organismos que, ao longo de centenas de milhões de anos, levou à otimização da eficiência dos fotorreceptores.

Outra observação interessante é que há comprimentos de onda quase totalmente absorvidos pelas moléculas da atmosfera, tais como CO₂ e vapor d'água. A razão entre a energia do espectro de radiação que atinge a superfície e a energia que chega à parte superior da atmosfera é aproximadamente 73%. Multiplicando-se

a constante solar por 0,73, chega-se a cerca de 1.000 W/m², que é um número fácil de guardar e conhecido como **um sol**.

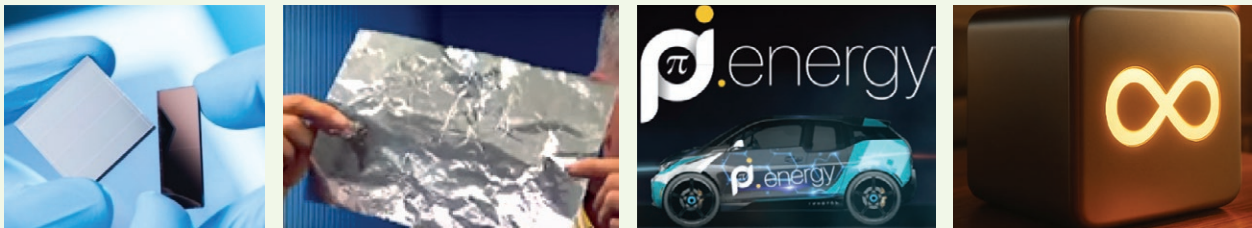
Levando ainda em conta a variação de intensidade de irradiância ao longo do dia (que inicia bem baixa ao nascer do sol, atinge o máximo ao meio-dia e depois volta a diminuir até ficar nula após o pôr do sol), a irradiação diária média é de 6 kWh/m², o que corresponde a uma irradiância diária média ao nível do mar de aproximadamente 250 W/m² (6.000Wh/24h). Ou seja, entre a irradiância incidente na parte superior da atmosfera (1.361 W/m²) e a irradiância média diária (250 W/m²), há uma perda em torno de 80%.

A.2 – Irradiação solar e estelar neutrinovoltáica

Assim como os fótons, corpúsculos não massivos, o sol e as demais estrelas emitem partículas com massa, entre elas os neutrinos, partículas subatômicas com as quais não conseguimos interagir, absorver ou capturar. Entretanto, pode-se captar parte da energia

cinética delas, ao passarem, e converter em energia elétrica, por meio das **células neutrinovoltáicas**, similares às **células fotovoltaicas**. Ver os desenvolvimentos científicos e tecnológicos no site, pelo link ^[105]: <https://neutrino-energy.com/>.

FIGURAS A.2 Placas neutrinovoltáicas, o veículo elétrico Pi, ou veículo Π e o Neutrino Power Cube.



Figuras A.2 – Tecnologia de célula neutrinovoltáica, o Automóvel Pi, ou Π, alimentado com energia neutrinovoltáica e Neutrino Power Cube. Foto de divulgação do Neutrino energy group.

Os pesquisadores do Neutrino Energy Group afirmam que, recorrendo a uma película de alta performance, revestida com o princípio neutrinovoltáico, e simplesmente com o tamanho de uma folha A4, consegue-se uma produção de energia de **2,7 W**.

Uma camada superior para interagir o ambiente é suficiente, mas, se forem usados painéis empilhados, cria-se um efeito de profundidade. Assim, os painéis de neutrinovoltáico empilhados criam esse efeito de profundidade, interagindo também com as camadas inferiores.

Acaba por ser um “*power pack*” do tamanho de uma resma de papel, possível de gerar eletricidade. Em condições controladas (laboratório), com esse sistema, gerou-se cerca **de 1,25 a 1,5 kW**.

Outros testes confirmaram a eficácia do método sob a superfície da Terra. Houve testes num poço no maciço suíço de São Gotardo em que os painéis neutrinovoltáicos se encontravam a mais de 40 metros da superfície terrestre, sem perda de eficiência.

Atualmente, o carro-chefe resultante dos estudos é o Neutrino Power Cube, um gerador

compacto de estado sólido capaz de fornecer de 5 a 6 kW de energia contínua em uma unidade aproximadamente do tamanho de uma geladeira compacta. Testes de campo reais na Europa, particularmente na Áustria e na Suíça, demonstraram operação estável sob diversas condições ambientais. As primeiras instalações de produção estão sendo comissionadas, e há planos em andamento para ampliar

a produção global para dezenas de gigawatts por ano.

Ao usar os fótons do sol, em todos os sistemas aqui estudados, trabalhou-se com a classe de energia fotônica (como partícula iniciadora da interação). Ao utilizar a energia neutrínovoltáica, inicia-se a era da classe de energia das partículas cinéticas – as outras duas são a classe gravitacional e a termodinâmica/pressão.

APÊNDICE B

O consumo energético anual global humano, fontes e reservas de energia no mundo em comparação com a solar

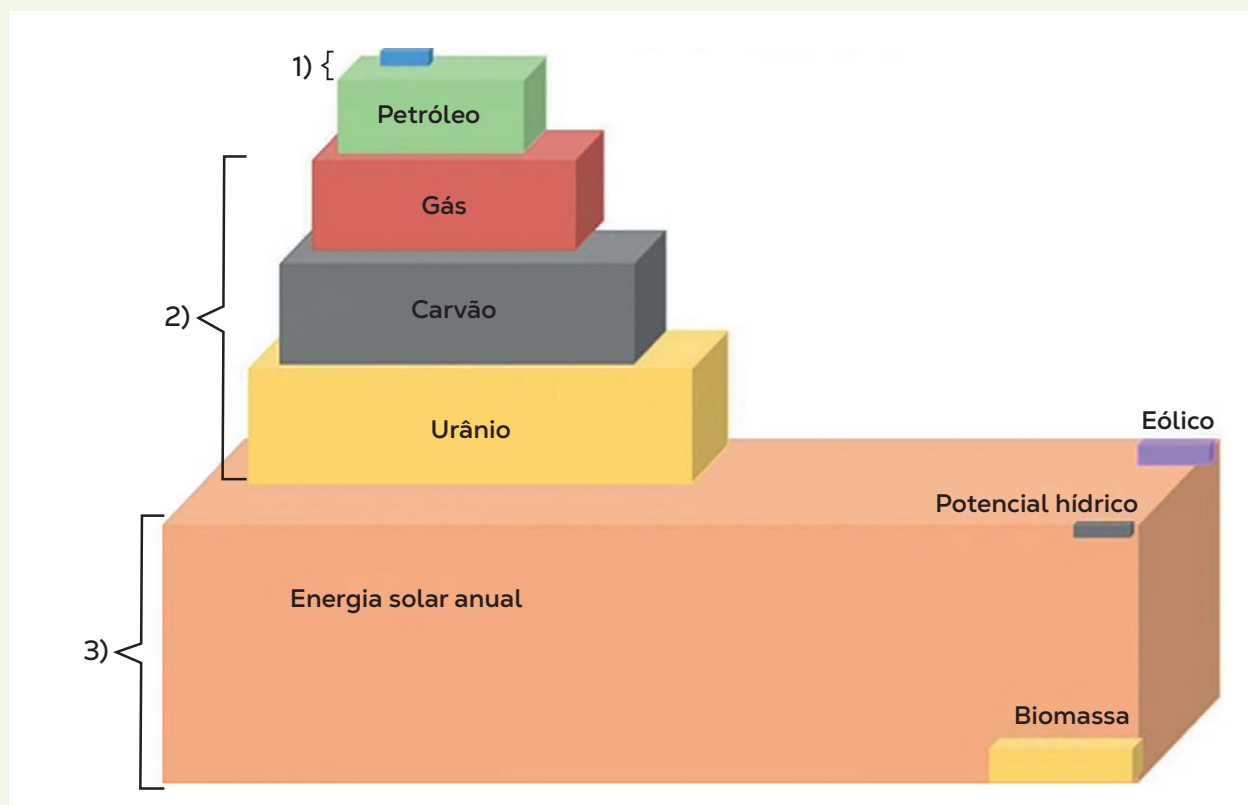
O Bloco 1, em azul, na figura 11.2, apresenta o consumo de energia anual global da humanidade. Exemplos de unidade de medida: em 1,5 trilhões de MWh/ano, ou, $1,5 \times 10^{12}$ MWh/ano.

Os blocos 2, contendo petróleo, gás, carvão e urânio, trazem a reserva total de fontes

energéticas não renováveis. Já o bloco 3 informa a capacidade energética anual das fontes renováveis: solar, biomassa ou fotossintética, eólica e hídrica.

Verifica-se o quanto mais abundante a fonte solar é em relação às demais.

FIGURA B.1 Consumo energético anual humano e as fontes e reservas de energia no mundo (unidade de energia)



Fonte: Kjaer, 2002. Tese 2013, Espanha. E MME, 2016.

APÊNDICE C

Instrumentos de medida da radiação solar

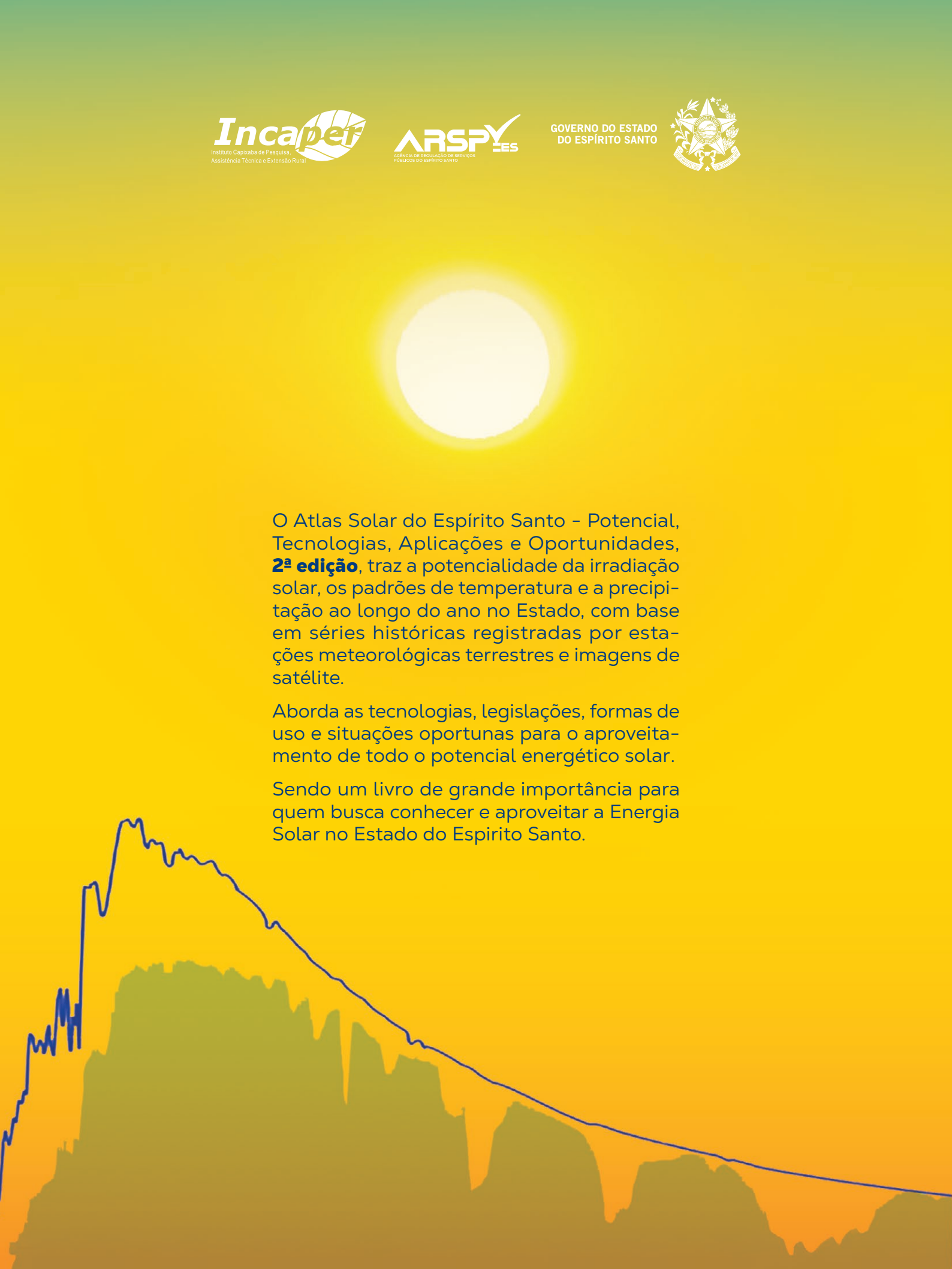
Para a mensuração da irradiação solar, são usados alguns instrumentos, como os piranômetros e os pireliômetros. Os piranômetros medem a irradiância total (direta + difusa), cobrindo com resolução constante um amplo espectro da radiação solar. Uma termopilha serve para medir a diferença de temperatura entre uma superfície pintada de preto e outra de branco, ambas igualmente iluminadas. A expansão sofrida pelas superfícies provoca uma diferença de

potencial que indica o valor da energia solar. Já os pireliômetros medem somente a irradiância direta. A luz entra no instrumento por meio de uma janela frontal, sendo também direcionada a uma termopilha. Esta converte calor em sinal elétrico, que é traduzido pelo equipamento para uma medida da insolação direta (Watts/m²). Os pireliômetros são bastante utilizados em sistemas que rastreiam o movimento solar de forma a maximizar a energia recebida.

FIGURAS C.1 Equipamentos de medição da irradiação solar, piranômetro e pireliômetro



Figuras C.1 – (a) Piranômetro de Radiação Solar Global, (b) Rastreador solar (Sun Tracker), (c) Piranômetro ou actinógrafo, (d) Pireliômetro, (e) Rastreador solar módulo simples, (f) Heliógrafo automático (duração de horas de brilho solar que antigamente era lida por meio do heliógrafo manual com tiras de papel). O rastreador utilizando os dois equipamentos. A haste escura mantém o piranômetro sombreado de forma a medir somente a radiação difusa. A radiação total neste arranjo é obtida somando-se a medição dos dois equipamentos.



O Atlas Solar do Espírito Santo - Potencial, Tecnologias, Aplicações e Oportunidades, **2ª edição**, traz a potencialidade da irradiação solar, os padrões de temperatura e a precipitação ao longo do ano no Estado, com base em séries históricas registradas por estações meteorológicas terrestres e imagens de satélite.

Aborda as tecnologias, legislações, formas de uso e situações oportunas para o aproveitamento de todo o potencial energético solar.

Sendo um livro de grande importância para quem busca conhecer e aproveitar a Energia Solar no Estado do Espírito Santo.