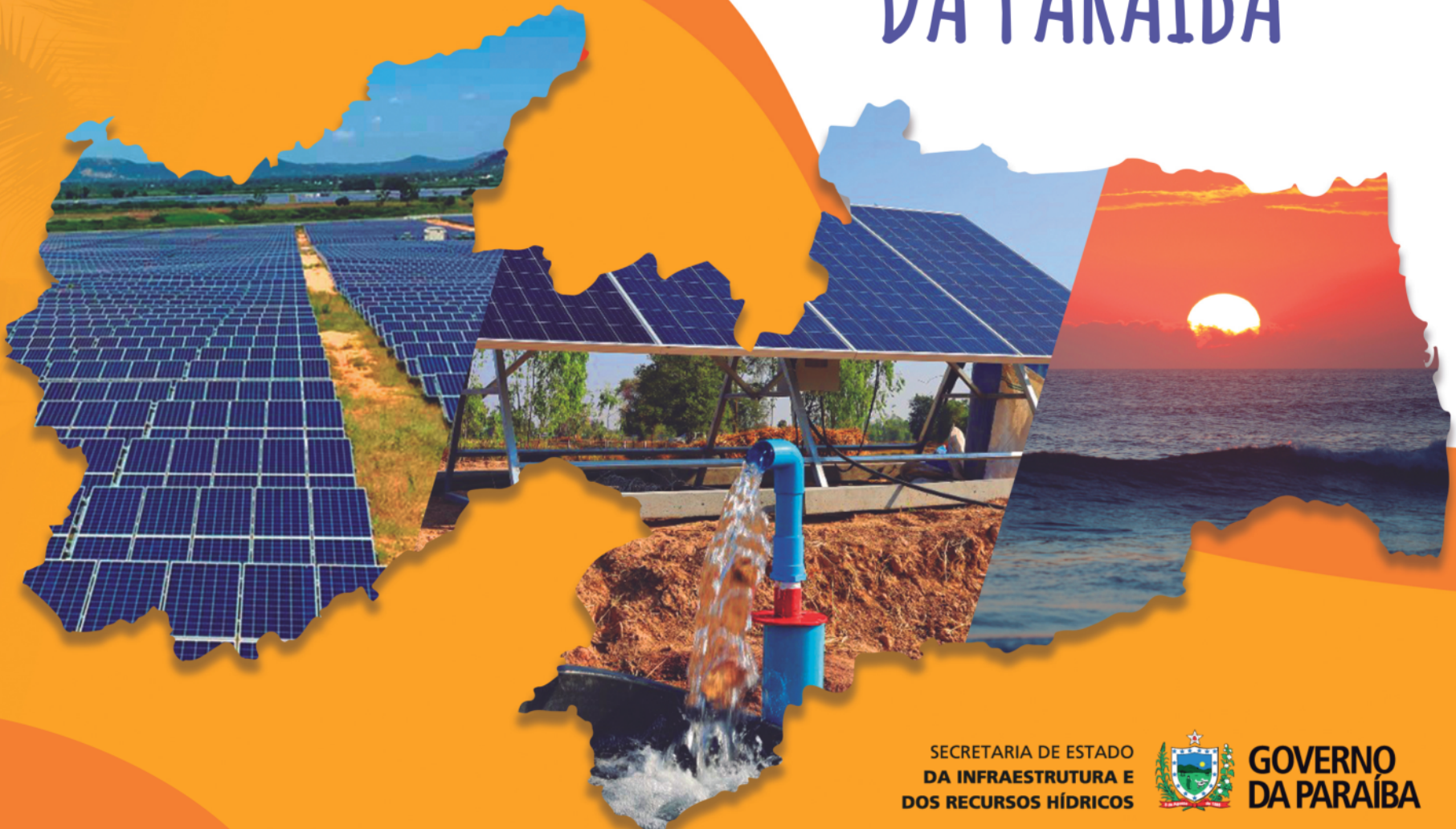




ATLAS SOLARIMÉTRICO DA PARAÍBA



SECRETARIA DE ESTADO
DA INFRAESTRUTURA E
DOS RECURSOS HÍDRICOS



GOVERNO
DA PARAÍBA



ATLAS SOLARIMÉTRICO DA PARAÍBA

SECRETARIA DE ESTADO
DA INFRAESTRUTURA E
DOS RECURSOS HÍDRICOS



GOVERNO
DA PARAÍBA

REALIZAÇÃO

Governo da Paraíba

João Azevêdo Lins Filho
Governador

Lucas Ribeiro Novais de Araújo
Vice-Governador

Deusdete Queiroga Filho
Secretário de Infraestrutura e Recursos Hídricos

Robson Barbosa
Secretário Executivo de Energia

Wagner Ribeiro Clemente
Gerente Executivo de Energia

Bruno Ribeiro de Araújo
Gerente Operacional de Eficiência Energética

Edson Pessoa Carvalho
Assessor Técnico

ELABORAÇÃO

Centro de Gestão de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação - CGPDI

Carlos Frederico de Angelis
Presidente

Daniilo Borges Fernandes
Diretor Executivo

Consultores Científicos

Fernando Ramos Martins

André Rodrigues Gonçalves

Rodrigo Santos Costa

Gerson Máximo Tiepolo

Enio Bueno Pereira

Modelagem de Transferência Radiativa

Madeleine Sanchez Gácita Casagrande

Francisco José Lopes de Lima

Vinicius Rogério da Rocha

Antonio Mauricio Zarzur

Helvécio Bezerra Leal Neto

Aquisição e Tratamento de Dados

Guilherme Baggio Martins Machado

Marcelo Pizzuti Pes

Sistema de Informações Geográficas

Silvia Vitorino Pereira

Ferramenta Web

K2 Sistemas

Dados solarimétricos coletados em solo

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Instituto Federal de Pernambuco (IFPE)

Casa dos Ventos

REVISÃO TÉCNICA

Centro de Energias Alternativas Renováveis (CEAR) - Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Flavio da Silva Vitorino Gomes

João Marcelo Dias Ferreira

Kleber Carneiro de Oliveira

NÚCLEO EDITORIAL

Projeto gráfico, edição e ilustrações

Silvia Vitorino Pereira - CGPDI

Capa

Máximo Serpa - SECOM-PB

Revisão Gráfica

Janildes Andrade - ASCOM/SEIRH-PB

Fotografia

Pulsar Imagens

Depositphotos

WEG

Impressão

TBN Gráfica & Editora

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

Paraíba (Estado). Secretaria de Estado da
Infraestrutura e dos Recursos Hídricos
Atlas solarimétrico da Paraíba / Secretaria de
Estado da Infraestrutura e dos Recursos Hídricos ;
[organização Danilo Borges Fernandes, Carlos
Frederico de Angelis]. -- Cachoeira Paulista, SP :
Centro de Gestão de Pesquisa, Desenvolvimento e
Inovação - CGPDI, 2023.

Vários colaboradores.

Bibliografia.

ISBN 978-65-980791-0-9

1. Atlas 2. Radiação solar 3. Receptores
sensoriais 4. Sensoriamento remoto - Imagens
I. Fernandes, Danilo Borges. II. Angelis,
Carlos Frederico de. III. Título.

23-163995

CDD-551.5271098133

Índices para catálogo sistemático:

1. Atlas solarimétrico : Medição : Paraíba :
Geologia 551.5271098133

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129



AGRADECIMENTOS

Este Atlas foi desenvolvido com elevado rigor técnico e sua realização se deve em grande parte à colaboração entre diversas pessoas, empresas e instituições, com o devido destaque a:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pelo compartilhamento de dados solarimétricos através de sua Rede SONDA e pela disponibilização do código do modelo BRASIL-SR;

NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) dos EUA pela disponibilização das imagens satelitais (GOES16 e projeto GridSat);

NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) pela disponibilização de dados de aerosol do produto MERRA-2;

Instituto Federal de Pernambuco (IFPE) pela disponibilização de dados através da Rede Solarimétrica de Pernambuco;

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pela disponibilização de dados de sua rede de PCDs;

Casa dos Ventos pelo compartilhamento de dados de estações solarimétricas no estado da Paraíba;

Centro de Energias Alternativas e Renováveis da Universidade Federal da Paraíba (CEAR/UFPB) pelo apoio na especificação e revisão deste Atlas;

Agência Executiva de Gestão das Águas (AESAs), **Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico do Estado da Paraíba (IPHAEP)**, **Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBIO)**, **Departamento de Estradas e Rodagens do Estado da Paraíba (DER)**, **Secretaria do Planejamento e Gestão (SEPLAG)**, **Superintendência de Administração do Meio Ambiente (SUDEMA)**, **Companhia de Energia do Estado da Paraíba (Energisa Paraíba)**, **Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS)**, pela disponibilização de dados ambientais e de infraestrutura.



APRESENTAÇÃO

Com uma localização estratégica e privilegiada, a Paraíba se caracteriza como uma das regiões com maior incidência de irradiação solar do mundo, atingindo um nível médio anual de 5,73 kWh/m² por dia, o que proporciona ao estado um expressivo potencial para geração de energia limpa e renovável.

Com foco no desenvolvimento sustentável, o Governo do Estado tem apoiado iniciativas que promovam a utilização de fontes renováveis de energia, não apenas por seus benefícios ambientais, mas também para estimular a economia local e gerar emprego, renda e qualidade de vida para nossa população.

Por isso, com o objetivo de consolidar a inserção da Paraíba nos cenários nacional e internacional de investimentos no setor, lançamos o

Atlas Solarimétrico, uma ferramenta que quantifica e indica, por meio de mapas georreferenciados, as regiões mais promissoras em recurso energético solar no estado, incluindo a estimativa do potencial técnico-econômico.

Totalmente interativo e disponível na internet, o Atlas se constitui como um importante instrumento para atrair empreendimentos de geração de energia.

Entre as funcionalidades, a ferramenta interativa permite a consulta de dados de irradiação, além de simulações de potência e geração de sistemas fotovoltaicos a partir de qualquer local de interesse selecionado, por meio de recursos de busca e seleção diretamente nos mapas georreferenciados.

Investidores, empreendedores locais de médio e pequeno porte, universidades, escolas e órgãos públicos poderão dispor de informações precisas para a tomada de decisões estratégicas e desenvolvimento de projetos inovadores em energia solar.

A Paraíba segue avançando e consolidando seu protagonismo econômico, construindo um futuro sustentável para os nossos paraibanos.

João Azevêdo Lins Filho
Governador

SUMÁRIO

Introdução 1

O Estado da Paraíba 3

Geografia 3

Vegetação 6

Aspectos climáticos 6

Hidrografia 10

Unidades de Conservação 14

Demografia 14

Economia 19

Sistema elétrico 20

Fundamentos da energia solar 24

Conceitos básicos da irradiação solar 24

Componentes da irradiação solar 25

Medição da radiação solar 27

Geração de eletricidade a partir de energia solar 29

Metodologia de elaboração do Atlas Solarimétrico 32

Descrição do modelo BRASIL-SR 32

Dados de entrada 33

Processamento computacional 36

Validação e análise de incertezas 37

Controle de qualidade 39

Métricas estatísticas 39

Comparação entre bases solarimétricas 40

Cartas solarimétricas 43

Irradiação Global Horizontal Anual 44

Irradiação Global Horizontal Mensal 45

Irradiação Global no Plano Inclinado a 10° Anual 46

Irradiação Global no Plano Inclinado a 10° Mensal 47

Irradiação Direta Normal Anual 48

Irradiação Direta Normal Mensal 49

Irradiação Difusa Horizontal Anual 50

Irradiação Difusa Horizontal Mensal 51

Potencial de geração fotovoltaica	52
Potencial teórico	52
Potencial técnico	52
Potencial econômico I	53
Potencial econômico II	53
Potencial econômico III	53
Outros aspectos relevantes	56
Energia solar térmica (ou termossolar)	56
Complementaridade (geração híbrida)	57
Hidrogênio verde	57
Energia solar e mitigação de emissões	57
Tecnologia, economia e geração de empregos	58
Variabilidade climática do potencial solar	59
Considerações finais	62
Anexo Legislação aplicada ao setor de energia	63
Índice de figuras, quadros e tabelas	67
Referências	69





INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico, a disponibilidade de informações cientificamente estabelecidas e a escala de mercado produziram as condições necessárias ao crescimento e a consolidação da energia solar, que é hoje a fonte de energia que mais cresce no mundo e no Brasil.

Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (P&D) foram realizados ao longo das duas últimas décadas para atender a forte demanda de dados solarimétricos confiáveis que possibilitassem compreender a distribuição espacial do recurso de energia solar e sua variabilidade ao longo do tempo, considerando a atenuação pela atmosfera e os fatores sazonais associados ao movimento orbital da Terra em torno do Sol. Em 2006, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) lançou a primeira edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar com uma metodologia inovadora empregando dados de satélite, que logo se tornou referência de informações para essa fonte de energia no país. O Atlas, em sua segunda edição revisada e ampliada de 2017, aponta o

Estado da Paraíba como uma das regiões do país com grande potencial para exploração da fonte solar.

Políticas públicas de incentivo à geração de eletricidade a partir de fontes renováveis de energia foram implementadas ao longo das duas últimas décadas com o intuito de diversificar a matriz elétrica do país, assegurando maior segurança energética, alinhadas aos compromissos internacionais de redução das emissões de gases de efeito estufa.

A primeira usina de geração solar fotovoltaica conectada ao Sistema Interligado Nacional (SIN) foi instalada no Brasil em agosto de 2011, no município de Tauá, no sertão do estado do Ceará e, a partir daí, iniciou-se a inserção continuada de novos projetos de centrais fotovoltaicas impulsionados, a princípio, pelos leilões de energia e, posteriormente, pelo mercado livre. O marco que estabeleceu a base para o mercado de microgeração e minigeração distribuída de energia no Brasil foi a Resolução Normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) nº 482/2012,

revista em 2015 pela Resolução Normativa nº 687 para a regulamentação do segmento de geração distribuída. Esta norma introduziu o sistema de compensação de energia junto às distribuidoras de energia elétrica, alavancando o crescimento da geração fotovoltaica por residências, estabelecimentos comerciais, industriais e o setor público. A Lei 14.300, de 06 de janeiro de 2023, instituiu o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, que regulamenta o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS) da geração distribuída.

A cadeia de produtos e serviços relacionados à geração solar fotovoltaica tornou-se um importante vetor da economia local e regional, promovendo a sustentabilidade ambiental e impulsionando a qualidade de vida e o desenvolvimento social através da geração de empregos qualificados. Além disso, vem promovendo o acesso à energia para a população ainda não atendida pela rede elétrica convencional e a expansão de

serviços básicos para a população em regiões remotas. Compreendendo a relevância desses aspectos, o Governo do Estado da Paraíba investiu na elaboração do Atlas Solarimétrico da Paraíba, disseminado por meio deste documento impresso e da ferramenta interativa web. Os dois produtos visam não somente a divulgação como também o acesso interativo amplo a um conjunto de informações confiáveis sobre a disponibilidade de energia fotovoltaica no território paraibano.

O Atlas foi desenvolvido com base em moderna tecnologia de modelagem computacional baseada em dados de satélites. Em sua versão interativa, permite a consulta e a simulação do aproveitamento do recurso solar em qualquer localidade ou área

do estado da Paraíba. As incertezas nas estimativas da irradiação solar incidente foram determinadas com base em dados observados em estações solarimétricas e meteorológicas terrestres operadas na região por instituições públicas e empreendedores privados, que colaboraram com este projeto.

A interface gráfica da ferramenta interativa na web foi elaborada para oferecer experiência intuitiva e amigável nas diversas plataformas digitais (computador, *smartphone* ou *tablet*), e disponibiliza relatórios que podem ser impressos ou armazenados no equipamento do usuário. Um tutorial interativo está disponível para orientar usuários em caso de dúvidas sobre os procedimentos de consulta ou simulação.

Sem dúvida, este Atlas Solarimétrico da Estado da Paraíba representa um marco importante na disseminação de informações confiáveis e cientificamente embasadas sobre o potencial de geração de energia solar, fomentando investimentos e geração de empregos, além de contribuir com o esforço mundial para reduzir as emissões de gases do efeito estufa por meio de uma fonte de energia inesgotável, limpa e abundante na região.





O ESTADO DA PARAÍBA

Geografia

O Estado da Paraíba está localizado entre as latitudes de 6° 1' 33" S a 7° 9' 18" S e os meridianos 34° 47' 34" O e 38° 45' 56" O, conforme ilustrado na [Figura 1.1](#). O território paraibano está localizado no Nordeste brasileiro, totalizando uma área de aproximadamente 56.470 km² (cerca de 0,7% do território brasileiro). Suas fronteiras encontram o Oceano Atlântico a leste e o estado do Ceará a oeste. As fronteiras sul e norte são delimitadas pelos estados de Pernambuco e Rio Grande do Norte, respectivamente.

O Estado da Paraíba é formado por 223 municípios, de acordo com a divisão estabelecida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) a partir de 2017. Conforme mostra a [Figura 1.1](#), o território paraibano está dividido em Regiões Geográficas Intermediárias e Imediatas, para fins de organização

territorial e planejamento de políticas públicas. As regiões geográficas são nomeadas a seguir, abordando as intermediárias e suas respectivas imediatas integrantes:

- João Pessoa: João Pessoa, Guarabira, Mamanguape - Rio Tinto e Itabaiana;
- Campina Grande: Campina Grande, Cuité - Nova Floresta, Monteiro e Sumé;
- Patos: Patos, Itaporanga, Catolé do Rocha - São Bento, Pombal e Princesa Isabel;
- Sousa-Cajazeiras: Sousa e Cajazeiras.

Sob o ponto de vista socioeconômico, o Governo do Estado da Paraíba adota a divisão clássica que agrega seus principais espaços econômicos nas seguintes zonas geoeconômicas: Litoral-Mata, Agreste-Brejo e Semiárido. A Zona Litoral-Mata corresponde à maior parte da Região Intermediária de João Pessoa, como definida pelo IBGE em 2021 e inclui trinta dos 223 municípios do Estado, ou seja, uma área de 5.242 km² (9,3% do território do estado). A Zona do Agreste-Brejo abrange quase que integralmente a Região Intermediária de

Campina Grande, tal como definida pelo IBGE em 2021, reunindo 48 municípios e com uma área total de 7.684 km² (13,6% da superfície total do Estado). A Zona Semiárida paraibana, de acordo com o que preconizam o Ministério de Integração Nacional e a Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), através da Resolução do Conselho Deliberativo (CONDEL) da SUDENE n° 107, de 27 de julho de 2017, Nota Técnica n° 0023/2017-SUDENE/DPLAN/CGEP, de 20 de novembro de 2017, e Resolução CONDEL da SUDENE n° 115, de 23 de novembro de 2017, abrange uma área de aproximadamente 51.306 km² (87,0 % do total do Estado), contemplando cerca de 194 municípios.

A [Figura 1.2](#) apresenta a topografia do Estado da Paraíba. O relevo do território paraibano caracteriza-se pela existência de uma faixa litorânea de baixada, pelo Planalto da Borborema na região central e pelo Planalto Ocidental no oeste do estado. Aproximadamente 90% do território paraibano apresenta altitudes inferiores a 600 m, com as maiores elevações situadas ao longo do Planalto da Borborema, sendo o ponto mais elevado o Pico do Jabre, com altitude

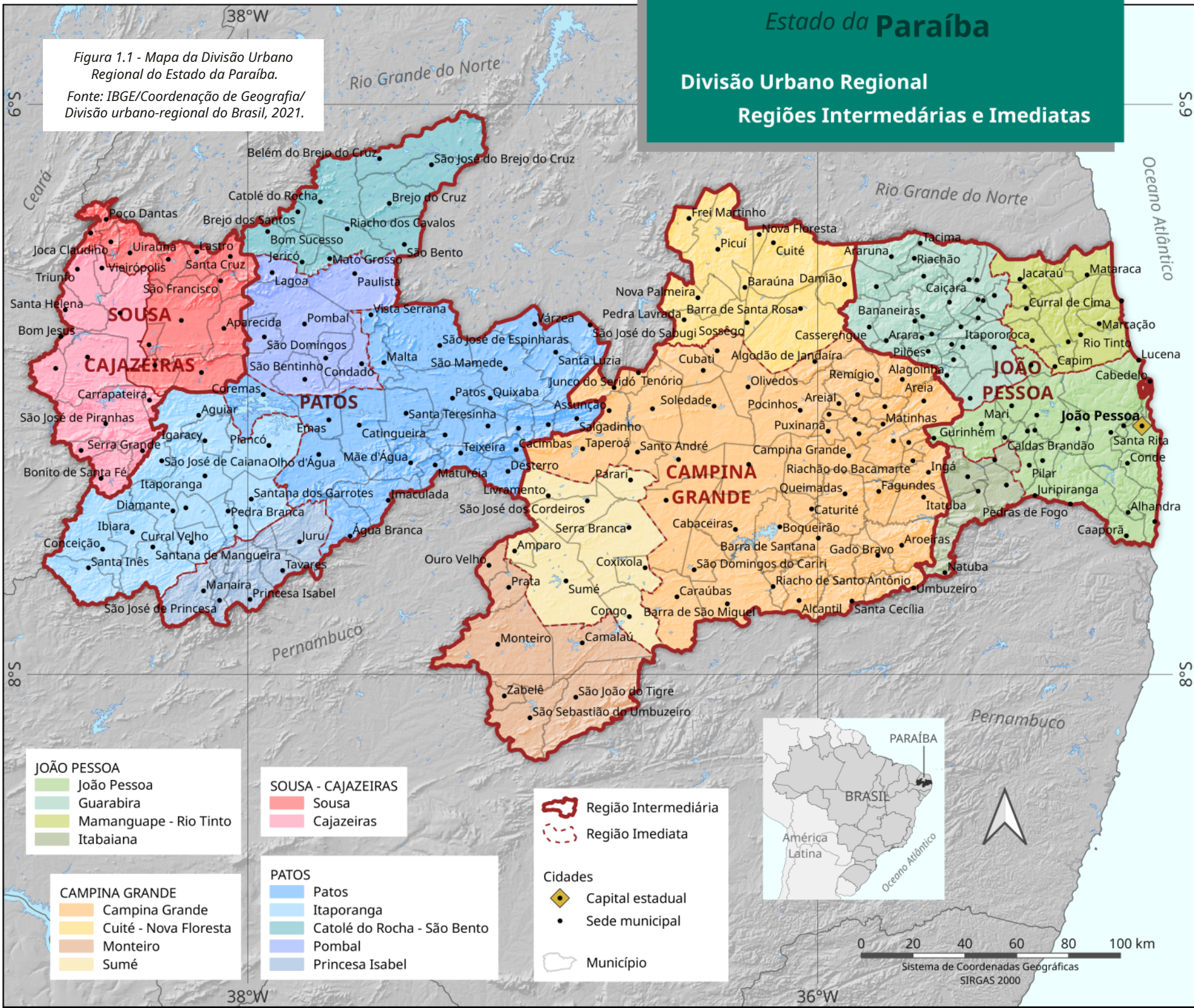
Estado da Paraíba

Divisão Urbano Regional

Regiões Intermediárias e Imediatas

Figura 1.1 - Mapa da Divisão Urbano Regional do Estado da Paraíba.

Fonte: IBGE/Coordenação de Geografia/Divisão urbano-regional do Brasil, 2021.



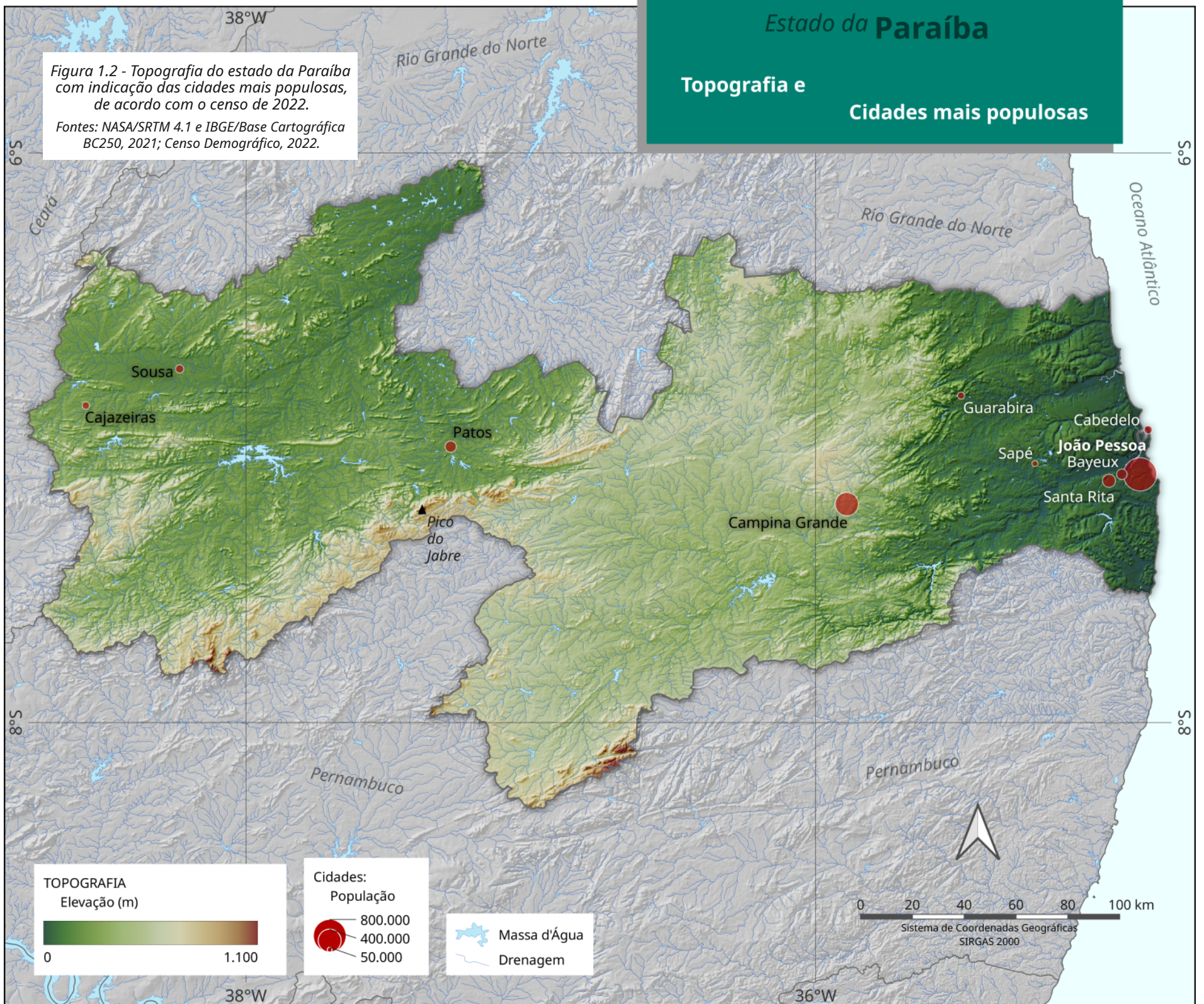
Estado da Paraíba

Topografia e

Cidades mais populosas

Figura 1.2 - Topografia do estado da Paraíba com indicação das cidades mais populosas, de acordo com o censo de 2022.

Fontes: NASA/SRTM 4.1 e IBGE/Base Cartográfica BC250, 2021; Censo Demográfico, 2022.



de 1.090 m. A Costa Atlântica do estado possui cerca de 120 km de extensão, onde ocorrem formações do tipo falésias, com altitudes inferiores a 60 m. A Depressão Sertaneja domina o relevo no oeste do Estado, caracterizado pela caatinga e o clima semiárido, com elevações variando entre 100 m e 400 m.

A **Figura 1.3** apresenta o mapa de declividade do território paraibano. A declividade do terreno é fator importante na escolha dos locais de implantação de usinas de geração fotovoltaica de grande porte. A literatura aponta que locais com declividades superiores a 5 graus (ou 8,7%) devem ser evitados em razão de aspectos relacionados ao escoamento superficial e riscos de processos de erosão do solo (Guarnieri, 2017; Al Guarni e Awasthi, 2017).

Vegetação

A Paraíba apresenta uma vegetação bastante diversificada, reflexo de sua riqueza ecológica, por englobar os biomas Caatinga e Mata Atlântica em seu território, o que lhe confere uma variedade de espécies adaptadas às diferentes condições climáticas e ambientais.

De acordo com o Serviço Florestal Brasileiro (2019), a Paraíba apresenta como florestas pelo menos 11 tipologias de vegetação, incluindo Savana-Estépica Arborizada e Florestada (Caatinga), Floresta Estacional Semidecidual, Floresta Ombrófila

Aberta, Savana Arborizada e Florestada, Manguezal, Palmeiral, Restingas, Florestas Plantadas e Contatos, onde ocorre mais de uma tipologia. A Savana-Estépica (Caatinga) é a tipologia predominante, cobrindo aproximadamente 94% das áreas de vegetação natural do estado (SFB, 2019).

Considerando o registro de espécies de plantas, incluindo angiospermas, samambaias e licófitas, as bases de dados para o Estado da Paraíba apresentam diferenças significativas, pois, enquanto o Projeto Flora e Funga do Brasil (2023) indica a ocorrência de 2390 espécies, a plataforma do SpeciesLink (CRIA, 2023) registra um número maior, de 4318 espécies.

Aspectos climáticos

Climatologicamente, o Nordeste Brasileiro (NEB) é conhecido pela sua alta variabilidade temporal e espacial da precipitação. Estas mesmas características podem ser verificadas na nossa área de interesse.

Na grande parte do território paraibano, os sistemas atmosféricos mais atuantes na Zona Semiárida são a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), os Eventos de Oscilação Sul (ENSO) – El Niño e La Niña, o Vórtice Ciclônico de Alto Nível (VCAN) e os Sistemas Frontais (Frentes Frias), que são responsáveis pelas chuvas distribuídas ao longo do ano. A atuação da ZCIT costuma ser mais presente no Semiárido durante os

meses de março e abril, justamente o período em que a estrutura está posicionada sobre o hemisfério sul.

Dentre os regimes típicos de precipitação observados no NEB, dois deles afetam o Estado da Paraíba: o primeiro se caracteriza por um quadrimestre chuvoso, bem definido, entre os meses de fevereiro e maio, e compreende as regiões de Sousa-Cajazeiras e Patos e as porções mais ao oeste e norte da região de Campina Grande, tendo como principais fenômenos meteorológicos a ZCIT, a convergência de umidade proveniente de brisas e de Perturbações Ondulatórias dos Alísios (POA's) e a convecção local (Molion e Bernardo, 2002).

O segundo regime se caracteriza por um quadrimestre chuvoso entre abril e julho, compreendendo a porção leste do estado (região de João Pessoa), ocasionado pelo aumento de atividade de circulação de brisa e máxima convergência dos alísios com brisas terrestres (Kousky, 1979), pelos distúrbios ondulatórios de leste (Ferreira et al., 1990) e pelo deslocamento de uma zona de convergência observada sobre a costa leste do Nordeste (Molion e Bernardo, 2000). Estes são os principais sistemas meteorológicos responsáveis pela precipitação no estado.

Conforme indica a **Figura 1.4**, a distribuição anual da precipitação apresenta alta variabilidade espacial. A porção central do estado, incluindo a região intermediária de Campina Grande e oeste da região de João Pessoa, apresenta os menores valores

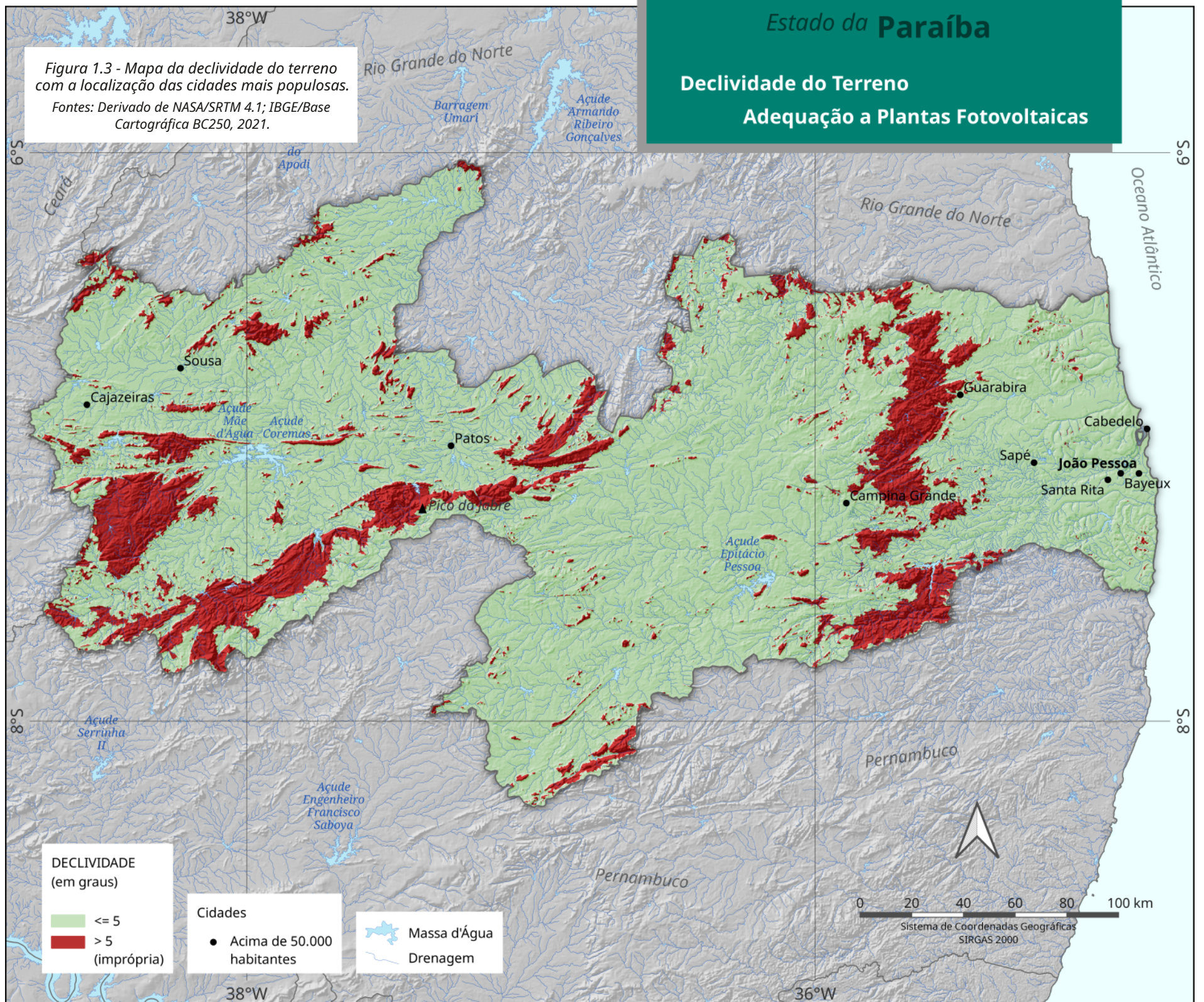
Estado da Paraíba

Declividade do Terreno

Adequação a Plantas Fotovoltaicas

Figura 1.3 - Mapa da declividade do terreno com a localização das cidades mais populosas.

Fontes: Derivado de NASA/SRTM 4.1; IBGE/Base Cartográfica BC250, 2021.



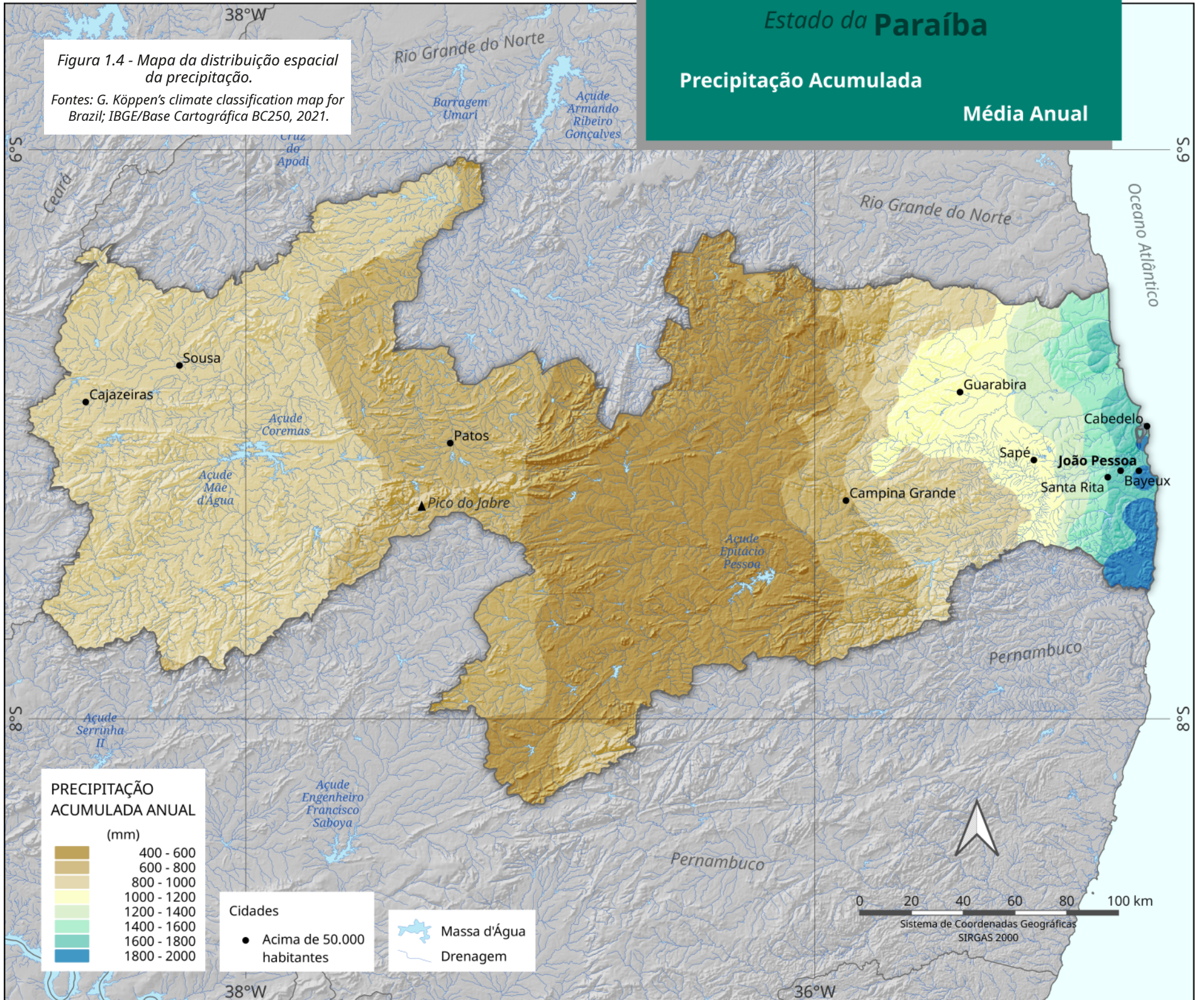
Estado da Paraíba

Precipitação Acumulada

Média Anual

Figura 1.4 - Mapa da distribuição espacial da precipitação.

Fontes: G. Köppen's climate classification map for Brazil; IBGE/Base Cartográfica BC250, 2021.



Vegetação



Planalto da Borborema



Litoral paraibano



Cacto quipá no Cariri paraibano



Mata Atlântica



Caatinga



Manguezais

acumulados anuais de precipitação entre 400 e 600 mm. A região de Sousa-Cajazeiras e o oeste da região de Patos apresentam precipitação anual entre 800 a 1000 mm e as porções mais a leste do estado apresentam valores de acima de 700 mm, com destaque para a região de João Pessoa, onde os acumulados anuais variam de 1200 a 1600 mm. A Precipitação é um importante elemento climático, pois promove a regulação da temperatura, funcionando como um controle para amplitudes térmicas extremas.

Segundo Francisco e Santos (2017) a classificação climática de Köppen mostra a predominância dos tipos “As” (clima tropical com verão seco) e “Bsh” (clima semiárido quente) no estado da Paraíba, conforme a **Figura 1.5**. O tipo “As” é observado no leste da região de João Pessoa, além de uma faixa na porção oeste e norte da região de Patos. O tipo “Bsh” pode ser verificado na região central do estado, compreendendo a região de Campina Grande a e o oeste da região de João Pessoa. Importante mencionar que na faixa central do estado a precipitação anual oscila entre 400 e 600 mm (**Figura 1.4**), sendo, portanto, uma das regiões com menores totais pluviométricos do País.

A **Figura 1.6** apresenta a distribuição espacial da temperatura diurna média anual do ar. Analisando o mapa, observa-se que os menores valores estão nas áreas de altitudes mais elevadas, destacando-se assim a porção centro-norte da região de Campina Grande. No setor mais a leste da região de Patos, onde predominam baixas altitudes, observa-

se as maiores médias de temperatura diurna do ar ao longo do ano. Importante comentar que este padrão pode ser observado no Estado da Paraíba durante todo o ano e que os meses com os menores valores de temperatura são junho, julho e agosto; já as temperaturas mais elevadas são observadas em outubro, novembro e dezembro.

Hidrografia

No Estado da Paraíba existem rios e riachos descritos como corpos de água lóticos ou cursos d’água naturais (intermitentes, efêmeros, perenes e perenizados), os quais possuem suas terminologias materializadas no art. 2º da Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) nº 141, de 10 de julho de 2012. Boa parte desses corpos de água lóticos ou cursos d’água naturais estão representados no enquadramento dos corpos d’água da Paraíba, elaborado pela Agência Executiva de Gestão das Águas (AESAs) e atualizada em parceria com a SUDEMA em 2014. Esses aspectos de ordenamento dos recursos hídricos estão materializados na Diretriz nº 201 do Sistema Estadual de Licenciamento de Atividades Poluidoras (SELAP) no ano de 1988 e podem ser visualizados em Banco de Dados Espacial (BDE) do SIG-WEB da Agência Executiva de Gestão das Águas (AESAs), através do endereço eletrônico <http://siegrh.aesa.pb.gov.br:8080/aesa-sig/>.

O governo da Paraíba estabeleceu, através da Lei Complementar 168/2021, as

microrregiões de Água e Esgoto do Alto Piranhas, Espinharas, Borborema e Litoral. A estrutura leva em consideração, dentre outros aspectos, a delimitação das bacias hidrográficas, a divisão da infraestrutura operacional dos serviços de saneamento básico, bem como as particularidades sociais, econômicas e políticas dos territórios envolvidos.

Os baixos índices de precipitações pluviométricas anuais constituem um fator limitante às regiões hidrográficas na Zona Semiárida da Paraíba, causando menos vazão e escoamento superficial nos rios e riachos. Nessas localidades, a caracterização hidrográfica é marcada pela presença de rios e riachos intermitentes e efêmeros.

As Bacias Hidrográficas da Paraíba constituídas essencialmente por rios perenes são as do Abiaí, Guaju, Mamanaguape, Miriri, Gramame, Camaratuba, bem como a Sub-Bacia hidrográfica do Baixo Paraíba.

O estado conta com inúmeros açudes e barragens construídos para mitigar o impacto das estações de seca, como, por exemplo, as demandas difusas (abastecimento humano de populações rurais, dessedentação animal e irrigação).

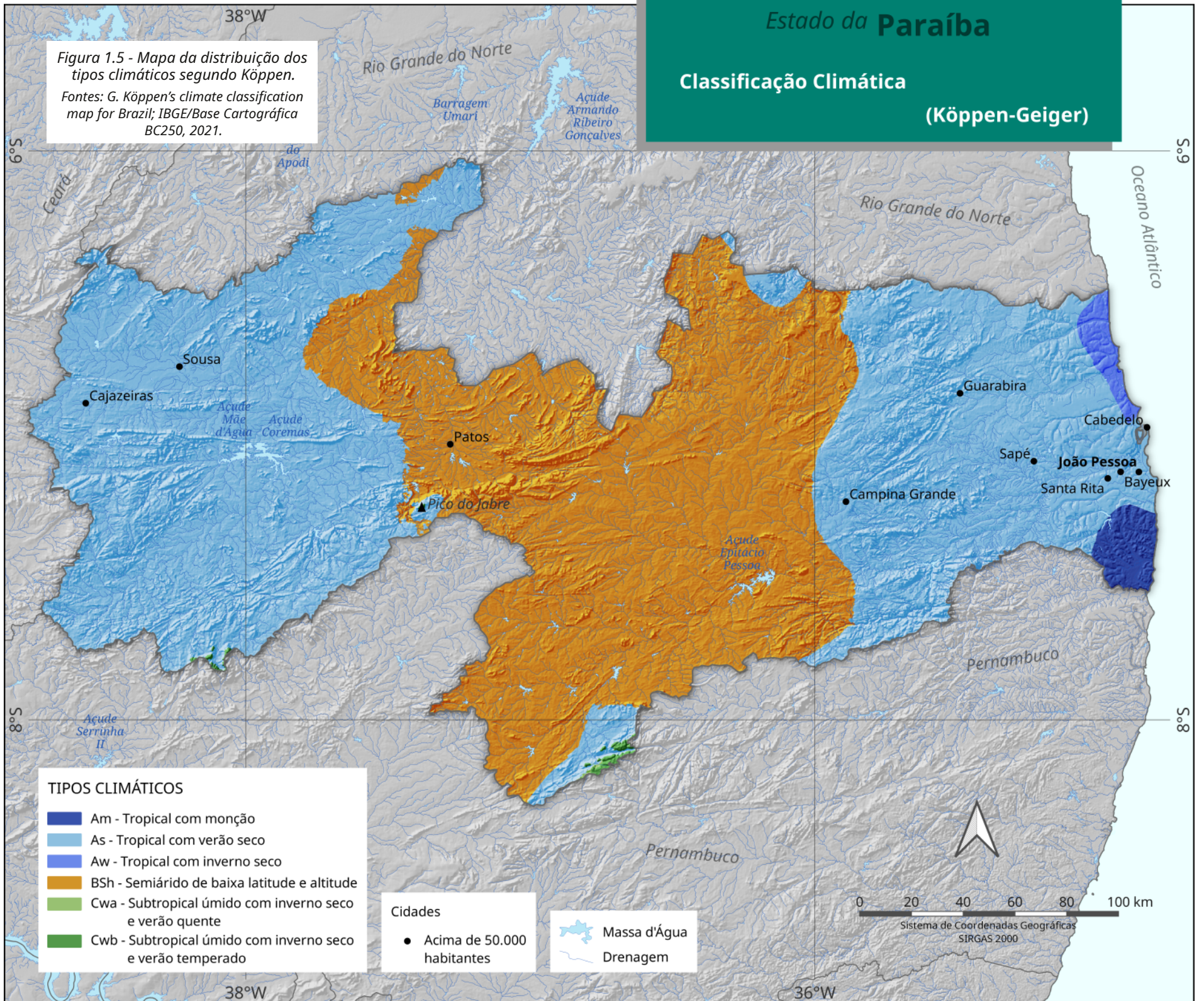
O Açude Coremas, o maior do estado em capacidade de armazenamento, com aproximadamente 590 hm³ e localizado na bacia do Rio Piancó, beneficia 112 municípios espalhados pela região de Patos (AESAs, 2020). A **Figura 1.7** apresenta o mapa de recursos hídricos do Estado da Paraíba

Estado da Paraíba

Classificação Climática

(Köppen-Geiger)

Figura 1.5 - Mapa da distribuição dos tipos climáticos segundo Köppen.
Fontes: G. Köppen's climate classification map for Brazil; IBGE/Base Cartográfica BC250, 2021.



Estado da Paraíba

Temperatura Diurna

Média Anual

Figura 1.6 - Mapa da temperatura diurna e cidades mais populosas.
Fontes: INMET/Estações Automáticas ; IBGE/ Base Cartográfica BC250, 2021; Censo Demográfico, 2022.

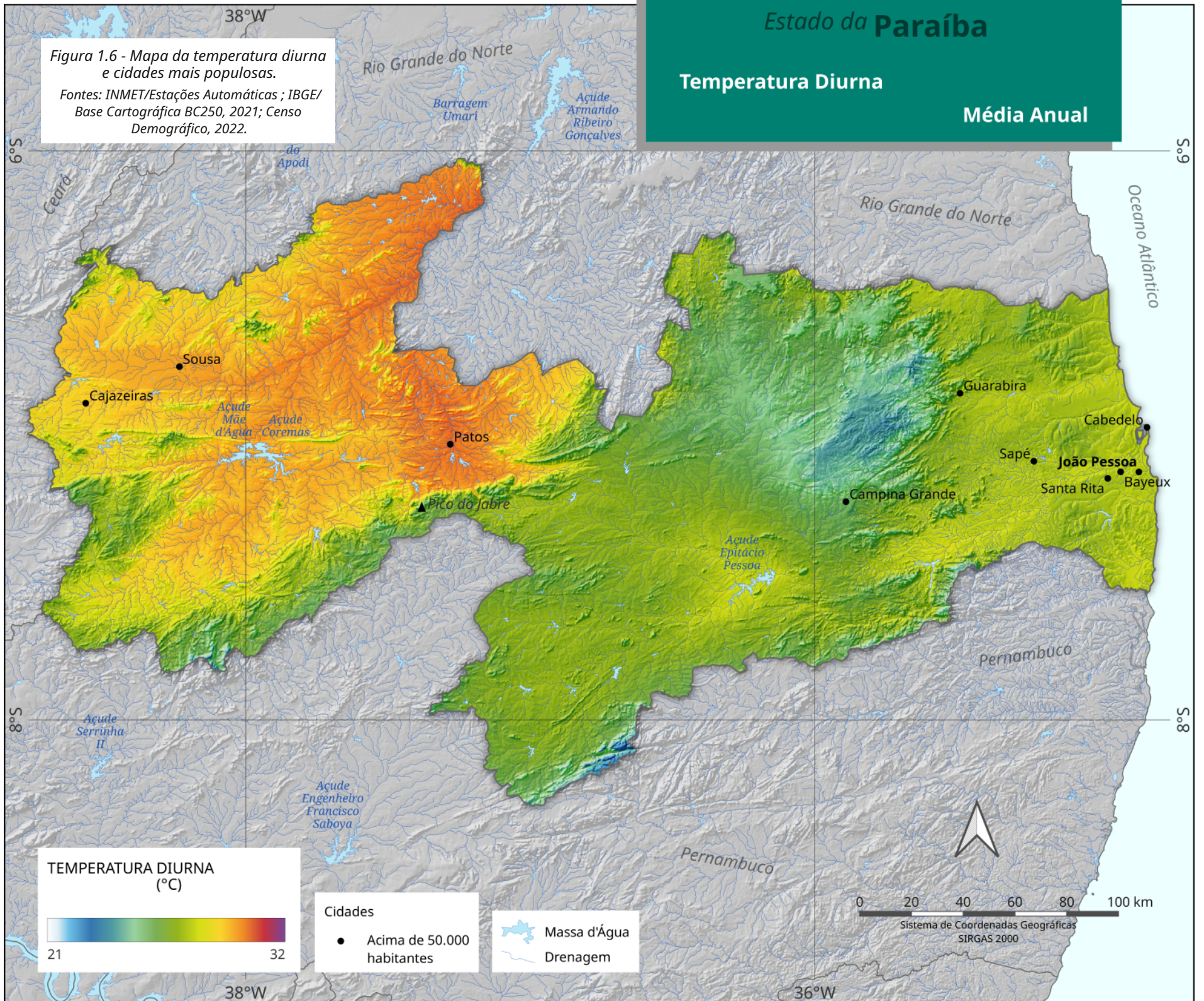
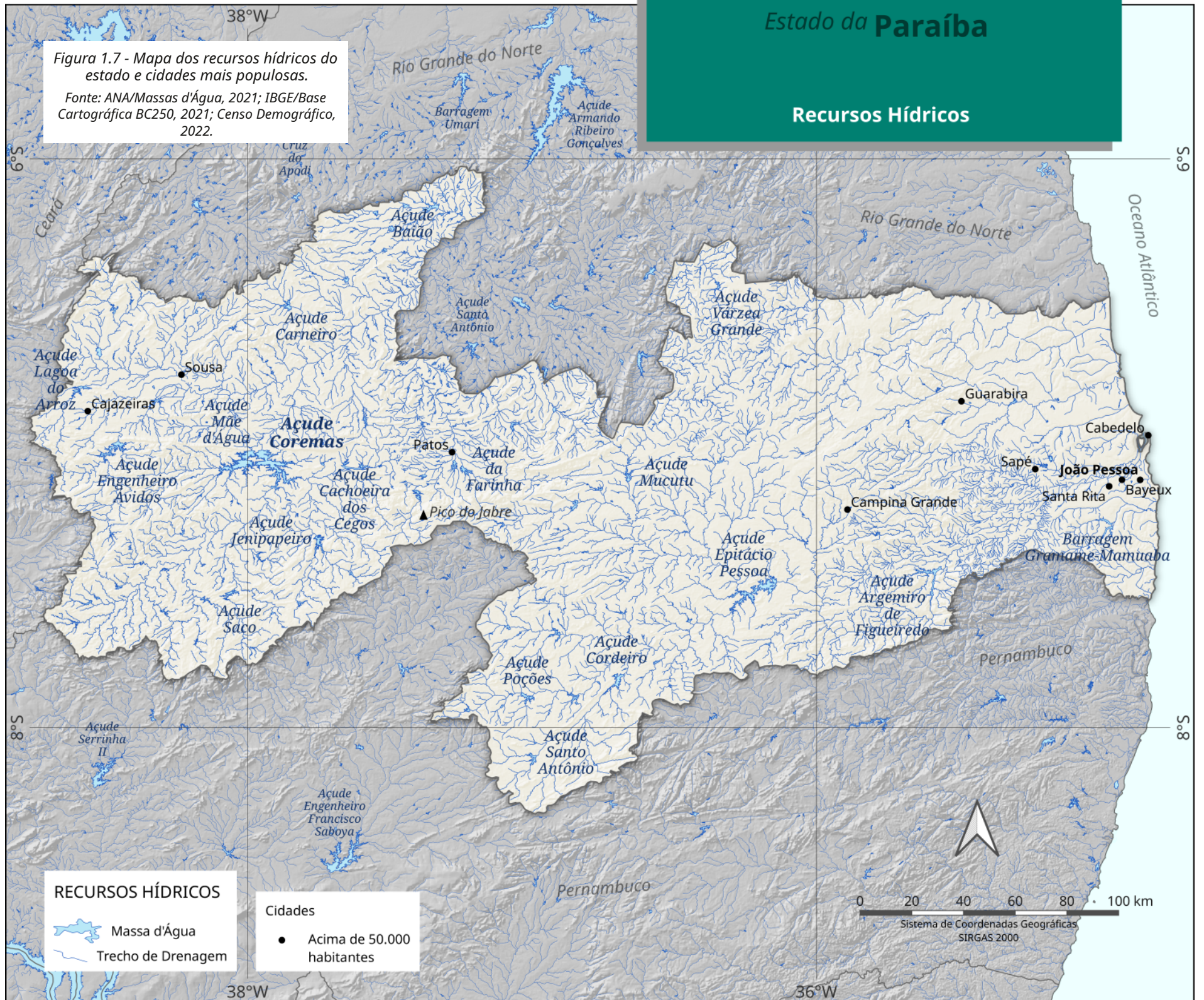


Figura 1.7 - Mapa dos recursos hídricos do estado e cidades mais populosas.

Fonte: ANA/Massas d'Água, 2021; IBGE/Base Cartográfica BC250, 2021; Censo Demográfico, 2022.



utilizado na elaboração dos cenários econômicos descritos mais adiante neste documento.

Unidades de Conservação

As Unidades de Conservação são territórios protegidos legalmente instituídos pelo Poder Público e que possuem como objetivo conservar os recursos ambientais inseridos em seus limites, incluindo as águas jurisdicionais, com características naturais relevantes. Para elas, é obrigatório regime especial de administração, ao qual se aplica garantias adequadas de proteção.

Estes territórios protegidos são classificados em dois grupos, de acordo com sua tipologia de uso: Proteção Integral e Uso Sustentável. Cada um desses grupos é subdividido em cinco e sete categorias, respectivamente, que se adaptam à realidade ambiental de cada local.

Ao total são 40 Unidades de Conservação na Paraíba, listadas na [Tabela 1.1](#), sendo 17 gerenciadas pelo estado através da SUDEMA, outras 16 no âmbito federal pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) e mais 7 que ficam a cargo de municípios. Entre as UC's, algumas são particulares. Denominadas Reservas Particulares do Patrimônio Natural, 9 estão na esfera federal e 2 na esfera estadual. A [Figura 1.8](#) apresenta o mapa com a localização das unidades de conservação.

Atualmente, na Paraíba, existem Unidades de Conservação protegendo paisagens naturais nos dois biomas existentes no território – Mata Atlântica e Caatinga – além de outras no ecossistema marinho.

Diversas atividades podem ser desenvolvidas nestes territórios protegidos, como, por exemplo, a educação ambiental, pesquisa científica, ecoturismo e extrativismo sustentável de recursos naturais renováveis.

Importante patrimônio natural está preservado nas Unidades de Conservação, como a biodiversidade ameaçada de extinção, a exemplo do pau-brasil (*Paubrasilia echinata*), com uma importante população resguardada na Estação Ecológica de mesmo nome, que possui um dos mais relevantes bancos de germoplasma desta espécie no país. Além disso, existem as aves endêmicas (Parque Estadual Mata do Pau-Ferro), as pinturas rupestres (APA das Onças) e os icnofósseis do período Cretáceo (Monumento Natural Vale dos Dinossauros) também protegidos nas UC's.

Um importante papel das Unidades de Conservação é preservar e estimular a manutenção do conhecimento tradicional das populações humanas inseridas no contexto socioambiental que as circundam. Na zona de amortecimento do Parque Estadual Marinho Areia Vermelha (PEMAV), o projeto denominado de Projeto de Integração com as Comunidades, apoiado pelo GEF-Mar e firmado por Acordo de Cooperação entre o Estado da Paraíba e o Ministério do Meio Ambiente, apoia as mulheres da colônia de

pescadores do Município de Cabedelo, com atividades como artesanato produzido pelas marisqueiras da comunidade Renascer.

Conhecer para conservar é uma máxima afirmativa que norteia a gestão das Unidades de Conservação. Através da participação popular, da divulgação científica e da vivência destes espaços é crer em um futuro onde os ecossistemas se perpetuarão para as futuras gerações.

Além das Unidades de Conservação, o Estado da Paraíba conta com Terras Indígenas demarcadas e em estudo e também Terras Quilombolas, como apresentado na [Figura 1.8](#) e nas [Tabelas 1.2](#) e [1.3](#).

Demografia

Segundo o Censo Demográfico do IBGE realizado em 2022, a população do Estado da Paraíba é de 3.974.495 habitantes, registrando uma taxa de crescimento de 0,45% ao ano no período entre 2010 e 2022. A densidade demográfica do estado é de 70,4 hab./km² ([Figura 1.9](#)). Os dados populacionais por sexo e residência urbana/rural ainda não haviam sido publicados pelo IBGE quando da impressão deste documento (julho/2023). Valores atualizados podem ser obtidos na página do Censo 2022, que pode ser acessada pela internet no endereço <http://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>.

Tabela 1.1 - Unidades de Conservação no Estado da Paraíba. A numeração (Id) indica a posição no mapa.

Fonte: MMA (Ministério do Meio Ambiente)/ICMBIO (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade), 2021; SUDEMA, Prefeituras Municipais de Cabedelo, Cacimba de Areia, Cajazeiras, João Pessoa e Mataraca.

Id	Unidade de Conservação	Área (ha)	Grupo	Esfera	Ato Legal	Município
12	Área de Proteção Ambiental Barra do Rio Mamanguape	14.917	Uso Sustentável	Federal	Decreto nº S/N de 07/03/1998	Baía da Traição, Lucena, Marcação, Rio Tinto
-	Área de Proteção Ambiental da Praia de Jacarapé	-	Uso Sustentável	Estadual	Lei de nº 11.422 de 28/08/2019	João Pessoa
18	Área de Proteção Ambiental das Onças	36.000	Uso Sustentável	Estadual	Decreto nº 22.880 de 26/03/2002	São João do Tigre
3	Área de Proteção Ambiental de Tambaba	11.500	Uso Sustentável	Estadual	Decreto nº 26.296 de 23/09/2005	Conde, Alhandra, Pitimbu
21	Área de Proteção Ambiental do Naufrágio Queimado	42.446	Uso Sustentável	Estadual	Decreto nº 38.931 de 28/12/2018	João Pessoa
13	Área de Proteção Ambiental do Roncador	6.113	Uso Sustentável	Estadual	Decreto nº 27.204 de 06/06/2006	Bananeiras, Pirpirituba
7	Área de Proteção Ambiental do Cariri	18.560	Uso Sustentável	Estadual	Decreto nº 25.083 de 08/06/2004	Boa Vista, Cabaceiras, São João do Cariri
-	Área de Proteção Ambiental Rosilda Cartaxo	-	-	Municipal	Lei nº 1.647 de 27/09/2006	Cajazeiras
8	Área de Relevante Interesse Ecológico Mata Goiamunduba	67	Uso Sustentável	Estadual	Decreto nº 23.833 de 29/12/2002	Bananeiras
2	Área de Relevante Interesse Ecológico Manguezais da Foz do Rio Mamanguape	5.769	Uso Sustentável	Federal	Decreto nº 91.890 de 05/11/1985	Marcação, Rio Tinto
14	Área de Relevante Interesse Ecológico da Barra do Rio Camaratuba	168	Uso Sustentável	Federal	Lei ordinária nº 272/2008 de 04/12/2008	Baía da Traição, Mataraca
11	Estação Ecológica do Pau Brasil	82	Proteção Integral	Estadual	Decreto nº 22.881 de 25/03/2002	Mamanguape
4	Floresta Nacional da Restinga de Cabedelo	117	Uso Sustentável	Federal	Decreto nº S/N de 02/06/2004	João Pessoa, Cabedelo
5	Monumento Natural Vale dos Dinossauros	40	Proteção Integral	Estadual	Decreto nº 23.832 de 27/12/2002	Sousa
-	Parque Ecológico do Distrito de Engenheiro Ávido	182	-	Municipal	Lei nº 1.147/GP 97 de 29/08/1997	Cajazeiras
-	Parque Ecológico Municipal da Barra do Rio Camaratuba	-	-	Municipal	Lei nº 001 de 13/02/1998	Mataraca
-	Parque Estadual da Mata do Xem-Xém	182	Proteção Integral	Estadual	Decreto nº 21.262 de 28/08/2000	Bayeux
-	Parque Estadual da Pedra da Boca	157	Proteção Integral	Estadual	Decreto nº 20.889 de 07/02/2000	Araruna
22	Parque Estadual da Serra da Santa Catarina	4.508	Proteção Integral	Estadual	Ano 2023	Aguiar, Nazarezinho, São José de Lagoa Tapada
19	Parque Estadual das Trilhas	851	Proteção Integral	Estadual	Decreto nº 37.653 de 15/09/2017	João Pessoa
20	Parque Estadual Marinho de Areia Vermelha	232	Proteção Integral	Estadual	Decreto nº 21.263 de 07/02/2000	Cabedelo
9	Parque Estadual Mata do Pau Ferro	607	Proteção Integral	Estadual	Decreto nº 26.098 de 04/08/2005	Areia
-	Parque Municipal de Cabedelo	50	-	Municipal	Decreto nº 12 de 16/04/2003	Cabedelo

Continua

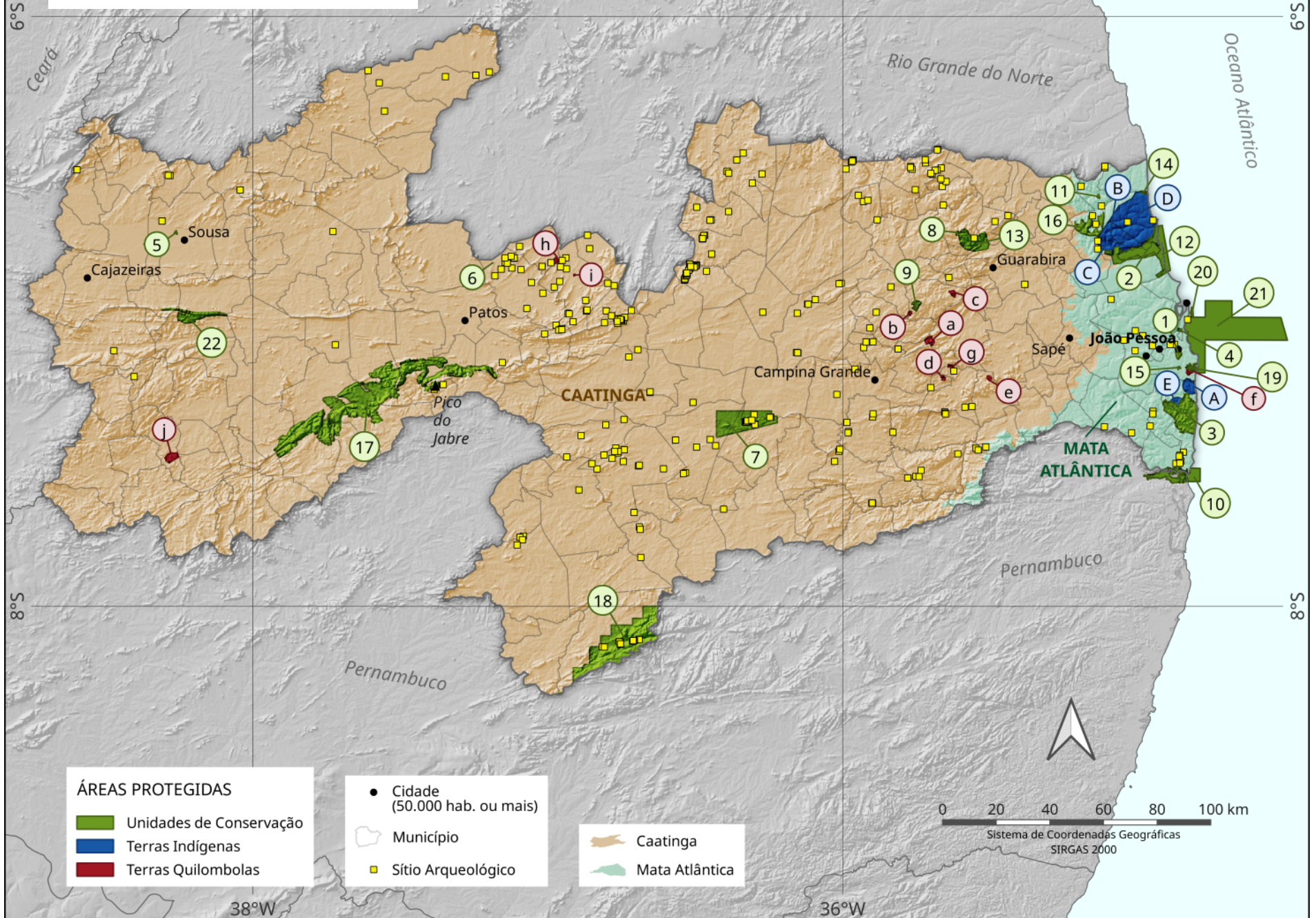
Continuação da Tabela 1.1

Id	Unidade de Conservação	Área (ha)	Grupo	Esfera	Ato Legal	Município
-	Parque Municipal Lauro Xavier	22	-	Municipal	Lei nº 9.839 de 16/12/2002	João Pessoa
17	Parque Nacional da Serra do Teixeira	61.095	Proteção Integral	Federal	Decreto nº 11.552 de 05/06/2023	Água Branca, Cacimba de Areia, Catingueira, Imaculada, Juru, Mãe d'Água, Matureia, Olho d'Água, Santa Terezinha, Santana dos Garrotes, São José do Bonfim e Teixeira
15	Parque Natural Municipal do Cuiá	43	Proteção Integral	Municipal	Decreto nº 7.517 de 17/04/2012	João Pessoa
1	Refúgio de Vida Silvestre Mata do Buraquinho	518	Proteção Integral	Estadual	Decreto nº 35.195 de 23/07/2014	João Pessoa
-	Reserva Ambiental do Município de Cacimba de Areia	-	-	Municipal	Lei nº 256 de 17/12/2007	Cacimba de Areia
16	Reserva Biológica Guaribas	4.052	Proteção Integral	Federal	Decreto nº 98.884 de 25/01/1990	Mamanguape, Rio Tinto
10	Reserva Extrativista Acaú-Goiana	6.677	Uso Sustentável	Federal	Decreto nº S/N de 26/09/2007	Caaporã, Pitimbu – PB Goiana – PE
6	Reserva Particular do Patrimônio Natural Arnil	5	Uso Sustentável	Federal	Portaria nº 195 de 14/03/2018	São Mamede
-	Reserva Particular do Patrimônio Natural Engenho Gargaú	1.059	Uso Sustentável	Federal	Portaria nº 064 de 15/06/1994	Santa Rita
-	Reserva Particular do Patrimônio Natural Fazenda Almas	3.505	Uso Sustentável	Federal	Portaria nº 1343 de 07/08/1990	São José dos Cordeiros
-	Reserva Particular do Patrimônio Natural Fazenda Cabeça de Boi	34	Uso Sustentável	Estadual	Portaria nº 30 de 29/06/2009	Pocinhos
-	Reserva Particular Do Patrimônio Natural Fazenda Pacatuba	267	Uso Sustentável	Federal	Portaria nº 110 de 29/12/1995	Sapé
-	Reserva Particular Do Patrimônio Natural Fazenda Pedra d'Água	170	Uso Sustentável	Federal	Portaria nº 60 de 16/07/1999	Solânea
-	Reserva Particular do Patrimônio Natural Fazenda Santa Clara	751	Uso Sustentável	Federal	Portaria nº 29 de 28/02/2002	São João do Cariri
-	Reserva Particular do Patrimônio Natural Fazenda Tamanduá	325	Uso Sustentável	Federal	Portaria nº 110 de 31/07/1998	Santa Teresinha
-	Reserva Particular do Patrimônio Natural Fazenda Várzea	391	Uso Sustentável	Federal	Portaria nº 11 de 23/01/1998	Araruna
-	Reserva Particular do Patrimônio Natural Gurugy dos Paus Ferros	10	Uso Sustentável	Estadual	Portaria nº 002 de 22/02/2010	Conde
-	Reserva Particular do Patrimônio Natural Major Badú Loureiro	186	Uso Sustentável	Federal	Portaria nº 109 de 04/09/2001	Catingueira

**Unidades de Conservação,
Terras Indígenas e Quilombolas**

Figura 1.8 - Unidades de Conservação, Terras Indígenas e Quilombolas (ver tabelas para identificação).

Fontes: SUDEMA-PB, 2023; MMA/ICMBIO, 2022; FUNAI, 2021; INCRA, 2021; IPHAN, 2021; IBGE/Base Cartográfica BC250.

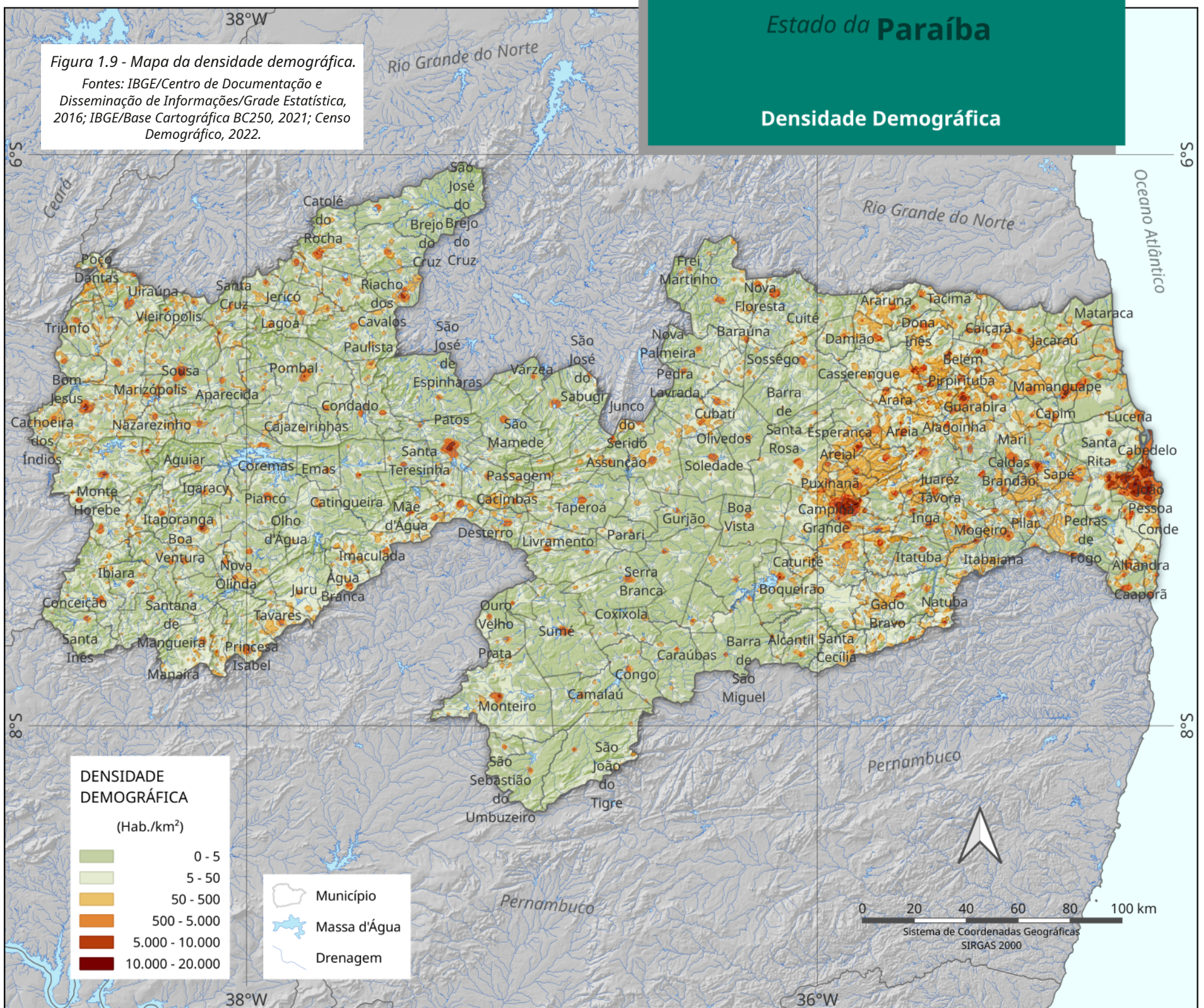


Estado da Paraíba

Densidade Demográfica

Figura 1.9 - Mapa da densidade demográfica.

Fontes: IBGE/Centro de Documentação e Disseminação de Informações/Grade Estatística, 2016; IBGE/Base Cartográfica BC250, 2021; Censo Demográfico, 2022.



Ainda considerando o Censo 2022, as cidades mais populosas da Paraíba são: João Pessoa, a capital do estado, com cerca de 834 mil habitantes; Campina Grande, com aproximadamente 420 mil habitantes; Santa Rita, com aproximadamente 150 mil hab.; Patos, com cerca de 105 mil hab. e Bayeux, com aproximadamente 83 mil habitantes.

Segundo o IPEA (2022), o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) do Estado da Paraíba avançou na última década, passando de 0,66 em 2010 para 0,72 em 2017.

Economia

Dados da Secretaria de Planejamento, Orçamento e Gestão do estado da Paraíba indicam que o Produto Interno Bruto (PIB) de 2020 foi de R\$ 70,3 bilhões. A **Figura 1.10** mostra a evolução do PIB paraibano ao longo da última década, com crescimento da ordem de 2,1 vezes entre 2010 e 2020.

A economia do estado da Paraíba baseia-se na produção agropecuária, na indústria de couro e no turismo. Os principais produtos agrícolas são: cana-de-açúcar, abacaxi, mandioca, milho, feijão e algodão herbáceo (IBGE, 2022). O estado possui um rebanho estimado em 1,3 milhões de cabeças de gado, criação de suínos, ovinos e equinos. Além de artigos de couro, também são industrializados produtos alimentícios e têxteis, açúcar e álcool.

Tabela 1.2 - Terras indígenas no Estado da Paraíba. As letras (Id) indicam a posição no mapa.

Fonte: FUNAI (Fundação Nacional do Índio), 2021.

Id	Terra Indígena	Área (ha)	Etnia	Município
A	Barra de Gramame		Tabajara	Conde
B	Jacaré de São Domingos	5037.1	Potiguara	Rio Tinto, Marcação
C	Monte-Mor	7628.7	Potiguara	Rio Tinto, Marcação
D	Potiguara	21283.8	Potiguara	Rio Tinto, Marcação, Baía da Traição
E	Vitória		Tabajara	Conde, Alhandra, Pitimbu

Tabela 1.3 - Terras quilombolas no Estado da Paraíba. As letras (Id) indicam a posição no mapa.

Fonte: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento / INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária), 2021.

Id	Terra Quilombola	Área (ha)	Famílias	Município
a	Caiana dos Crioulos	67.6	98	Alagoa Grande, Matinhas e Massaranduba
b	Engenho Bonfim	12.2	21	Areia
c	Engenho Mundo Novo	32.2	37	Areia
d	Grilo	13.9	78	Riachão do Bacamarte
e	Matão	21.4	29	Mogeiro
f	Paratibe	26.8	114	João Pessoa
g	Pedra d'Água	13.2		Ingá
h	Pitombeira	35.4	80	Várzea
i	Serra do Talhado	1.6	125	Santa Luzia
j	Vaca Morta	118.9	57	Diamante

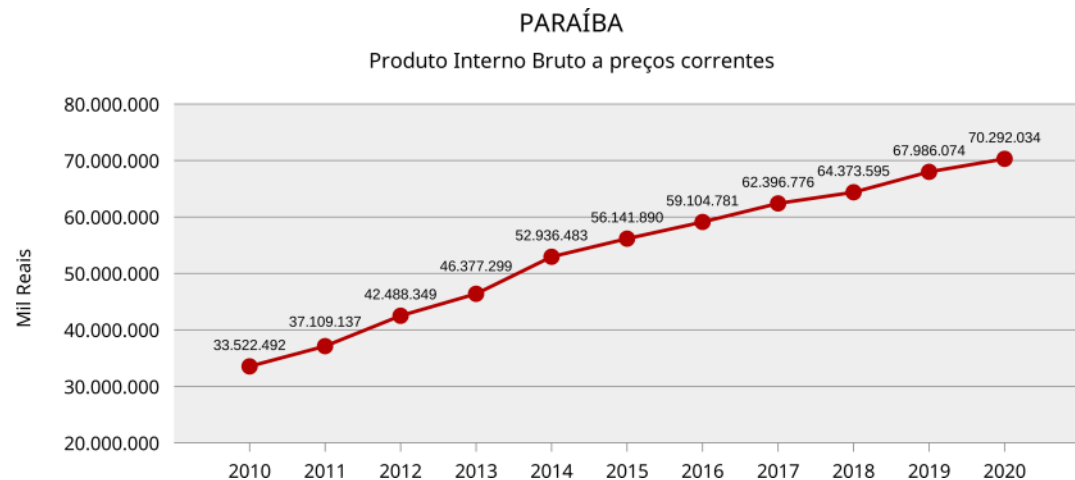


Figura 1.10 - Evolução do Produto Interno Bruto do Estado da Paraíba.

Fonte: IBGE, em parceria com os Órgãos Estaduais de Estatística, Secretarias Estaduais de Governo e Superintendência da Zona Franca de Manaus - SUFRAMA.

Sistema elétrico

Segundo o Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA), a capacidade instalada de geração de eletricidade no Brasil (potência fiscalizada) é de cerca de 189.871 MW, sendo a solar fotovoltaica responsável por 4,1% da geração centralizada. Mas ao considerar-se também o potencial já existente em geração distribuída (GD – 17.000 MW), a capacidade instalada no Brasil (centralizada + GD) é de 206.871 MW, sendo a solar fotovoltaica responsável por 11,8% deste total, o que a coloca como a segunda maior fonte renovável no país, atrás apenas da fonte hídrica (ANEEL/SIGA, 2023; ANEEL/Geração Distribuída, 2023).

No Estado da Paraíba, a participação da energia solar fotovoltaica se destaca ainda mais. A capacidade instalada de geração de eletricidade no estado é de 1.733 MW (potência fiscalizada – geração centralizada), o que corresponde a 0,9% do país, sendo a solar fotovoltaica responsável por 26,2% (454 MW). Ao considerar-se também a capacidade instalada da geração distribuída, o estado alcança 1.992 MW (potência fiscalizada), sendo a solar fotovoltaica responsável por 35,7% deste total, o que a coloca como a fonte de energia mais importante do estado (ANEEL/SIGA, 2023; ANEEL/Geração Distribuída, 2023). Ao analisar-se

a fonte solar fotovoltaica como geração distribuída, percebe-se que as instalações estão concentradas principalmente nas classes comercial e residencial com 40,9% e 40,8% respectivamente, conforme apresentado na [Figura 1.11](#).

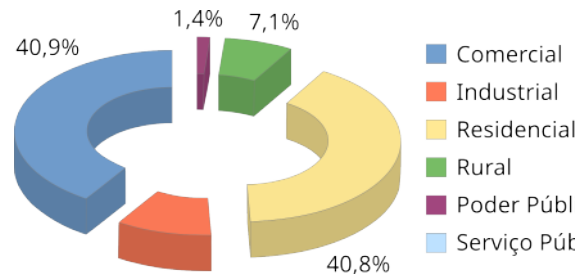


Figura 1.11 - Percentual de participação por classe de consumo da fonte solar fotovoltaica na GD.

Adaptado de ANEEL/Geração Distribuída, 2023.

A [Tabela 1.4](#) apresenta a lista das maiores plantas de geração fotovoltaica em operação no Estado da Paraíba – geração centralizada (ANEEL/SIGA, 2023).

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN, 2022), o Estado da Paraíba foi responsável pela geração de aproximadamente 3.434 GWh em 2021, equivalentes a 2,3% do total produzido na região Nordeste e 0,5% do total produzido no Brasil. As fontes renováveis de energia participam com aproximadamente 1680 Gwh (49%) da matriz elétrica da Paraíba. Usinas termoeletricas participam com 1750 Gwh (51%), como mostrado na [Figura 1.12](#). Apenas o setor residencial foi responsável pelo consumo de 2.346 GWh ou 68% do total gerado no estado.

O Estado da Paraíba reúne condições de assumir maior protagonismo na geração de energia elétrica considerando o potencial disponível dos recursos solar e eólico.

Com relação ao potencial de geração solar fotovoltaica, estudos anteriores mostram que o Estado da Paraíba está localizado dentro do cinturão solar (Pereira et al., 2017), apresentando elevados índices de radiação solar. Este atlas detalha a distribuição espacial e temporal da irradiação solar incidente na superfície no território paraibano, demonstrando que o estado apresenta enorme potencial de expansão desse setor.

O Atlas Eólico do Estado da Paraíba (<https://mapaeolico.pb.gov.br/>) indica que mais de 90% das áreas com maior potencial eólico ocorrem a distâncias inferiores a 40 km de uma das subestações em operação no estado.

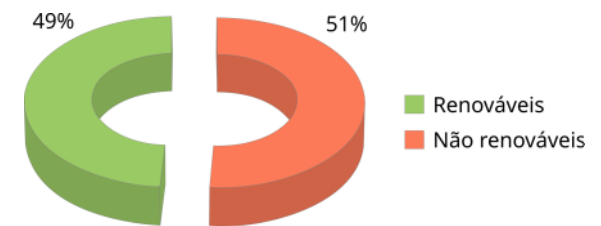


Figura 1.12 - Percentual de participação das fontes renováveis na matriz energética da Paraíba.

Adaptado de ANEEL/BEN, 2022.

Tabela 1.4 - Principais plantas de geração fotovoltaica em operação no estado da Paraíba.

Fonte: ANEEL/SIGA, 2023.

Empreendimento	Potência outorgada (MWp)	Município
Luzia 3	58,93	Santa Luzia
Luzia 2	39,29	Santa Luzia
Rio do Peixe II	36,01	São João do Rio do Peixe
Lagoa 1	32,89	São José da Lagoa Tapada
Lagoa 2	32,89	São José da Lagoa Tapada
Rio do Peixe I	32,74	São João do Rio do Peixe
Angico I	27,20	Condado
Malta	27,20	Malta
Coremas I	27,00	Coremas
Coremas III	27,00	Coremas
Coremas VII	27,00	Coremas
Coremas V	27,00	Coremas
Coremas II	27,00	Coremas
Coremas VIII	27,00	Coremas
Coremas IV	27,00	Coremas
Coremas VI	27,00	Pombal

As informações sobre o sistema elétrico que atende o Estado da Paraíba foram disponibilizadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e utilizadas para a elaboração dos cenários de aproveitamento do recurso solar apresentados mais adiante neste documento.

Segundo a ANEEL e a EPE, o sistema de transmissão do Estado da Paraíba é constituído por linhas de 500kV e 230kV. Essas linhas atendem o estado como ilustrado na [Figura 1.13](#).

O sistema de distribuição, segundo a Base de Dados Geográfica da Distribuidora (BDGD), sob responsabilidade da ANEEL, é constituído primariamente por linhas em 69 kV operadas em concessão atualmente pela empresa Energisa Paraíba, que atende todo o estado, conforme apresentado também na [Figura 1.13](#).

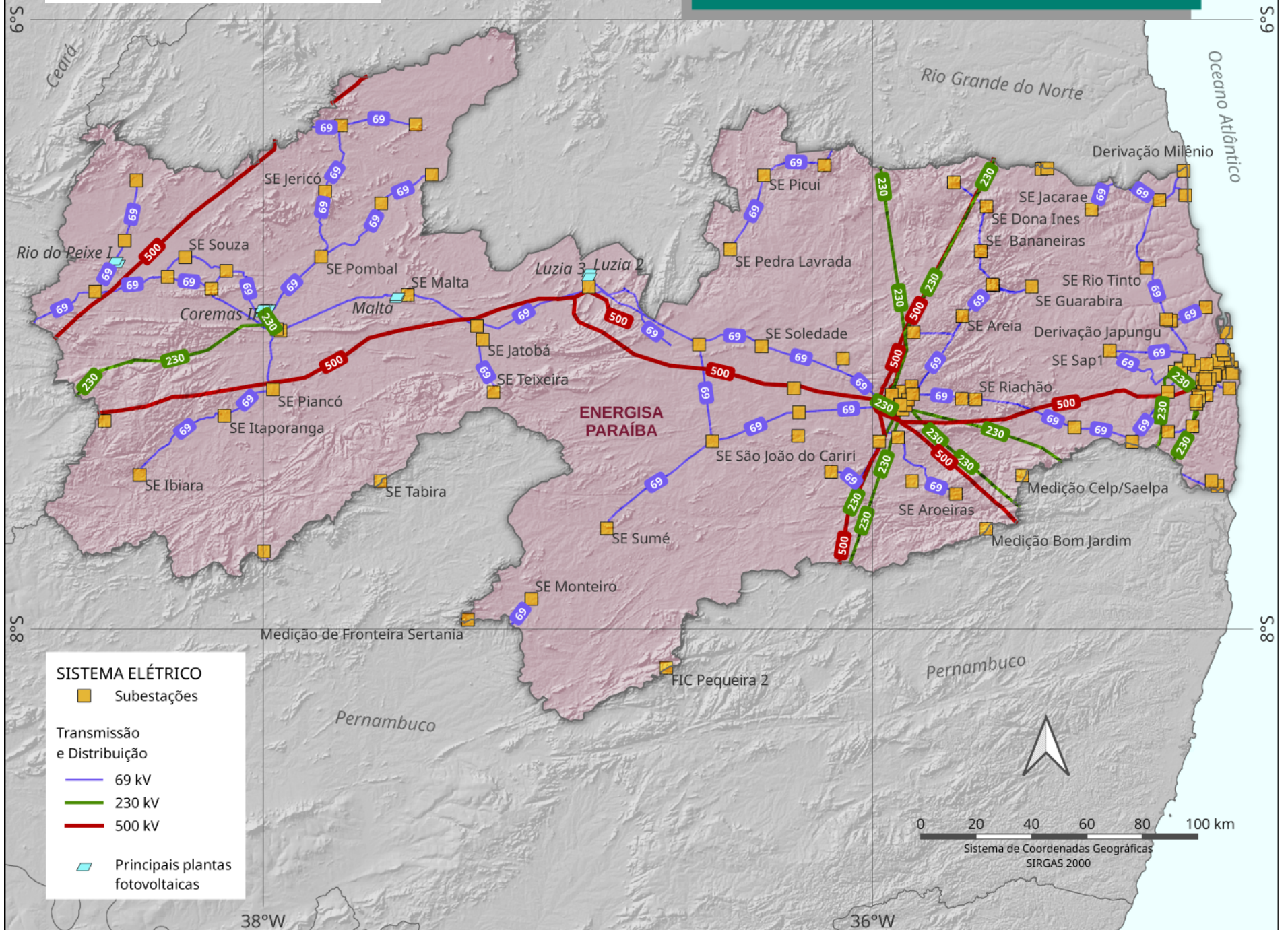
Estado da Paraíba

Sistema Elétrico

Transmissão e Distribuição

Figura 1.13 - Sistema elétrico do estado da Paraíba incluindo linhas de transmissão e distribuição e plantas de geração.

Fonte: ANEEL (2022) e EPE (2023).



Algumas usinas fotovoltaicas em operação na Paraíba



Complexo Solar Coremas, inaugurado em setembro de 2020, no município de Coremas, Paraíba (-6.9564° , -37.9937°). O complexo é composto por oito usinas solares de 27 MWp (Megawatts-pico) de capacidade de geração cada (Coremas I, a VIII), incluindo subestação e linha de transmissão.



FUNDAMENTOS DA ENERGIA SOLAR

Conceitos básicos da irradiação solar

A radiação solar é a fonte de energia a ser adotada para geração de energia elétrica por meio de duas tecnologias já consolidadas no mercado: a geração fotovoltaica e a geração heliotérmica. A energia solar também tem aplicações na produção de calor para atender demandas da produção agropecuária, dos processos industriais e dos sistemas de aquecimento da água para residências.

A energia solar é resultado da fusão nuclear dos átomos de Hidrogênio, que representa cerca de 75% da composição do Sol. Essa fusão ocorre a uma taxa aproximadamente constante há bilhões de anos, com uma potência instantânea da ordem de $3,86 \times 10^{26}$ W. Apenas parte da energia emitida pelo Sol atinge o topo da atmosfera de nosso planeta Terra. A quantidade de energia que chega ao topo da atmosfera

terrestre tem sido medida desde o início da década de 1970 por diferentes técnicas e instrumentos e é conhecida como Constante Solar. A *American Society for Testing and Materials* (ASTM) estabeleceu como padrão para tal quantidade, mais reconhecido mundialmente, o valor de $1.366,1 \pm 2,5$ W/m², denominado ASTM E490-00a (ASTM, 2019).

Entre os diversos fatores que influenciam a quantidade e variabilidade da energia solar que incide na superfície da Terra, os mais importantes são o movimento de translação da Terra em torno do Sol, em uma órbita elíptica com a duração aproximada de 365 dias, 5 horas, 48 minutos e 48 segundos, e o movimento de rotação em torno de um eixo polar com inclinação de 23,45° em relação ao plano da órbita solar (eclíptica), que define o ciclo diário. Esses dois movimentos combinados definem os ciclos diário (dia/noite) e sazonal associados às estações do ano – verão,

outono, inverno e primavera. A [Figura 2.1](#) ilustra esses dois principais movimentos e suas efemérides principais.

Os componentes atmosféricos (gases e particulados presentes na atmosfera) possuem papel importante na atenuação da radiação solar devido aos processos de interação como a absorção e o espalhamento da radiação solar. Esses processos radiativos na atmosfera também determinam a disponibilidade e a variabilidade da incidência de energia solar na superfície empregada na geração de eletricidade e outros fins.



Figura 2.1 - Movimento da Terra em torno do Sol tendo como referência as datas das efemérides relevantes para o Hemisfério Sul.

Fonte: Martins e Pereira, 2019.

Para compreender os ciclos diários e sazonais da radiação solar incidente na superfície, é necessário entender uma série de conceitos estabelecidos com base na posição relativa entre o Sol e a Terra. Os principais ângulos notáveis estão ilustrados na [Figura 2.2](#) e são: ângulo zenital (θ_z), a altitude ou elevação (α), o ângulo Azimutal Solar (γ_s). A declinação solar (δ), ilustrada na [Figura 2.3](#), é o ângulo entre uma linha imaginária que une os centros do Sol e da Terra e o plano equatorial terrestre.

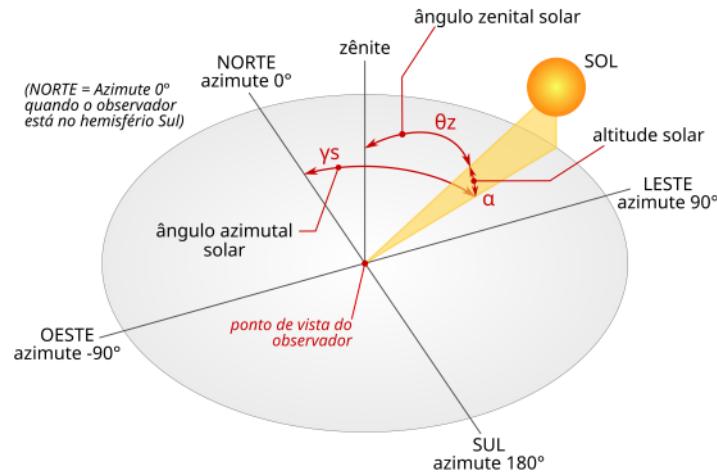


Figura 2.2 - Representação gráfica dos principais ângulos que definem a posição do Sol na abóbada celeste.

Fonte: Martins e Pereira, *Energia solar: estimativa e previsão de potencial solar*. Appris, 2019.

Um conceito muito importante é o fotoperíodo, que corresponde ao intervalo de tempo do percurso do Sol no céu, do nascer ao pôr do Sol. Isso dá origem aos conceitos de crepúsculo (alvorada/ocaso) como o definido pela norma ABTN (NBR-5123), que estabelece normas para a iluminação pública.

Componentes da irradiação solar

A atmosfera terrestre atua sobre o espectro da radiação solar incidente através de fenômenos de espalhamento e absorção seletiva em determinados comprimentos de onda. O espalhamento ocorre quando uma fração do feixe de radiação proveniente do Sol é subtraída do

fluxo na direção da incidência e é reirradiada em comprimentos de onda maiores em direções aleatórias. O processo de espalhamento depende da relação entre o tamanho do espalhador e o comprimento de onda da radiação espalhada. O espalhamento causado por gases atmosféricos é descrito como espalhamento Rayleigh, já o espalhamento causado pelas partículas em suspensão na atmosfera e gotículas presentes nas nuvens é descrito pela teoria do espalhamento Mie (Yamasoe e Corrêa, 2016).

A absorção seletiva de comprimentos de onda específicos da radiação solar ocorre devido a fenômenos quânticos de interação da radiação com a matéria. Os componentes atmosféricos que mais fortemente contribuem para a absorção da

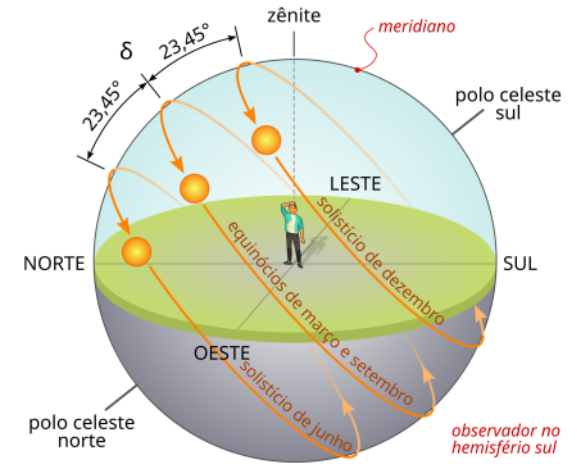


Figura 2.3 - Ilustração do ângulo de declinação (δ), que varia de $23,45^\circ$ norte até $23,45^\circ$ sul.

Fonte: Martins e Pereira, 2019.

radiação solar incidente são o ozônio (O_3), na faixa de radiação ultravioleta, o vapor d'água e o gás carbônico (CO_2), nas faixas de radiação do visível e do infravermelho próximo. Como resultado dessas interações da radiação solar com a atmosfera, o espectro solar resultante que chega à superfície é fortemente alterado, conforme ilustra a [Figura 2.4](#).

A **irradiância solar** é definida como o fluxo instantâneo de energia radiante que incide sobre uma superfície por unidade de área, sendo expressa em W/m^2 (Watt por metro quadrado). Já a **irradiação solar** é obtida pela integração da irradiância solar ao longo de um intervalo de tempo. Sua unidade de medida no Sistema Internacional (SI) é expressa em J/m^2 (Joule por metro quadrado). No entanto, o setor de geração de energia

tem adotado usualmente a unidade Wh/m² (Watt-hora por metro quadrado) para expressar a irradiação solar. Esta grandeza é muito utilizada em dimensionamentos de sistemas fotovoltaicos.

A irradiação solar é classificada nas componentes Global, Direta e Difusa, com base nos processos radiativos de espalhamento na atmosfera. A irradiação solar também pode ser determinada considerando a geometria e localização da superfície sobre a qual ocorre a incidência: Plano Inclinado, Plano Horizontal e Extraterrestre. Com base nessas classificações, são apresentadas a seguir as definições adotadas no Atlas Solarimétrico da Paraíba:

- **Irradiância extraterrestre (G_0):** é o fluxo instantâneo de energia solar incidente em um plano horizontal imaginário situ-

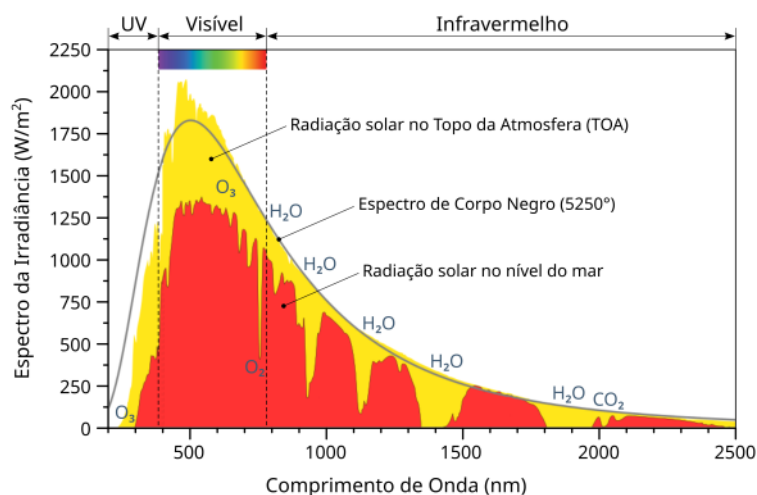


Figura 2.4 - Espectro da radiação solar incidente no topo da atmosfera e na superfície terrestre ilustrando as bandas de absorção e a faixa da radiação visível.

ado no topo da atmosfera. É também conhecida como irradiação no topo da atmosfera (TOA);

- **Irradiância difusa (G_{dif} ou DHI):** é o fluxo instantâneo de energia solar incidente sobre uma superfície horizontal, decorrente do espalhamento do feixe solar direto pelos constituintes atmosféricos (moléculas, material particulado, nuvens, etc.);
- **Irradiância direta normal (G_n ou DNI):** é o fluxo instantâneo de energia solar proveniente diretamente do Sol que incide sobre uma superfície em direção normal ao feixe de radiação solar, sem sofrer nenhum espalhamento durante o seu percurso na atmosfera;
- **Irradiância direta (G_{dir}):** é a parcela da irradiação solar direta (G_n) que incide perpendicularmente a uma superfície horizontal, determinada como o produto entre a irradiação direta normal (G_n) e o cosseno do ângulo zenital solar (θ_z);
- **Irradiância global horizontal (G ou GHI):** é o fluxo instantâneo de energia solar incidente sobre uma superfície horizontal, constituída pelo somatório das irradiações solar direta e difusa, ou seja, $G = G_{dif} + G_{dir}$ ou $G = G_{dif} + G_n \cdot \cos(\theta_z)$;
- **Irradiância global no plano inclinado (G_{TI_i}):** é o fluxo instantâneo de energia solar por unidade de área incidente sobre um plano inclinado em

relação à superfície da Terra. Em geral, essa nomenclatura é adotada para descrever a irradiação solar em um plano com ângulo de inclinação em relação ao plano horizontal e com face voltada para o norte (ou sul) geográfico no hemisfério sul (ou norte).

As componentes da irradiação solar podem ser vistas na Figura 2.5.

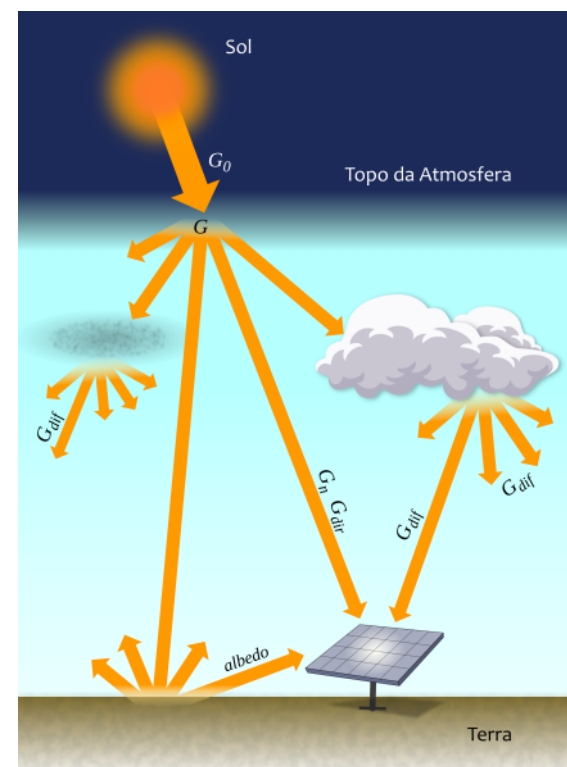


Figura 2.5 - Componentes da radiação solar incidente sobre um coletor solar em um plano inclinado.

Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar - INPE, 2017.

Medição da radiação solar

Vários métodos baseados em diferentes processos físicos são utilizados nas medições da energia solar incidente na superfície, conforme ilustra a [Tabela 2.1](#). Os sensores modernos, utilizados para aquisição de dados de radiação solar, avaliam o parâmetro físico medido por meio de um sinal elétrico e são denominados gene-

ricamente radiômetros. As normas ISO (*International Organization for Standardization*) e a WMO (*World Meteorological Organization*) estabelecem classificações e especificações para a medição de irradiância solar (ISO 1990; WMO 2008).

Os piranômetros são instrumentos mais modernos e geralmente mais utilizados nas medições da irradiância solar global (GHI). Esses equipamentos utilizam mais comumente dois tipos de sensores: o sensor

termopilha (conjunto de termopares) ou o sensor fotodiodo.







Em geral, os equipamentos são divididos em três classes distintas:

- alta qualidade (denominados como padrões secundários);
- boa qualidade (instrumentos de primeira classe);
- qualidade moderada (instrumentos de segunda classe).

Os piranômetros de termopilha possuem uma curva de resposta espectral praticamente plana entre 300 e 3000 nm (faixa espectral que compreende a radiação visível e parte da radiação ultravioleta e infravermelha), cobrindo todo o espectro de radiação solar de interesse, conforme visto na [Figura 2.6](#). Atualmente, o piranômetro de termopilha constitui o sistema de maior acurácia (primeira classe) para medir a radiação solar, uma vez que a curva de resposta de sensores fotodiodos apresentam uma dependência espectral grande e cobrem parcialmente o espectro de radiação solar incidente na superfície terrestre.

A aquisição de dados de irradiância solar direta normal pode ser realizada de duas maneiras. A metodologia direta emprega um pireliômetro com elemento sensor de termopilha. O pireliômetro precisa estar acoplado a um sistema robotizado de seguimento do disco solar, conforme ilustra a [Figura 2.7 \(a\)](#), para manter o sensor sempre iluminado pela radiação solar ao longo do dia.

Tabela 2.1 - Principais processos físicos em que se baseiam registros de radiação solar.

Categoria	Processo de medida	Sensores	Imagem
Indireto	Duração do brilho solar (insolação)	Heliógrafo	
Mecânico	Bimetal	Actinógrafo	
Térmico	Transformação da energia radiante de ondas curtas em ondas longas (termopilha)	Piranômetro Pirheliômetro Pirgeômetro	
Elétrico	Efeito fotoelétrico	Luxímetro Fotodiodo Medidor Quantum	
Ótico	Conversão de radiação UV através de elementos fluorescentes	Radiômetro GUV	
Molecular	Reação química em emulsões	Filme fotográfico	

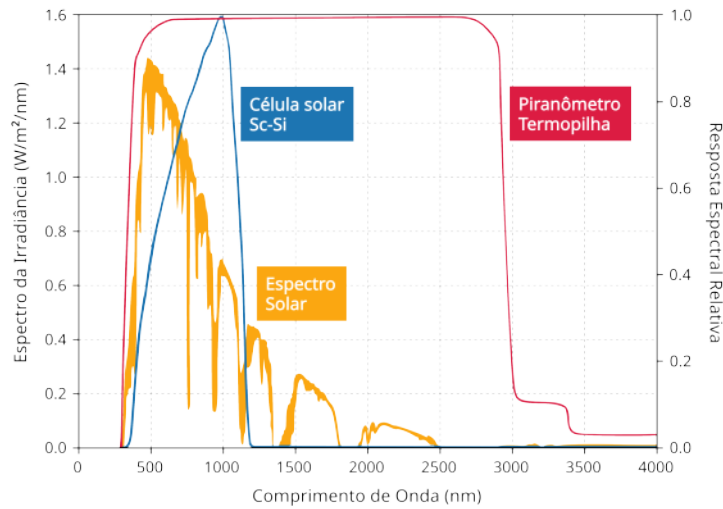


Figura 2.6 - Respostas espectrais relativas de uma célula solar Sc-Si e de um piranômetro termopilha.

Fonte: Neves, 2021.

A metodologia indireta utiliza um par de piranômetros, sendo que um deles deve ser constantemente sombreado com emprego de um anel (ou esfera acompanhada por um rastreador solar) para medir a componente difusa (DHI) da irradiância solar, conforme ilustra a Figura 2.7 (b). A irradiância solar direta (G_{dir}) é obtida por simples subtração entre a radiação global (GHI) e a componente difusa da radiação solar (DHI) e posterior correção do ângulo zenital solar.

As medições da irradiância solar são realizadas no campo por estações solari-métricas com várias configurações. Contudo, para fins de obtenção de dados destinados a projetos de geração solar, as medidas das várias componentes da radiação solar incidente são sempre acompanhadas de medidas de variáveis me-

teorológicas tais como a temperatura ambiente e a velocidade do vento, com uma frequência de aquisição igual à adotada para as medidas de irradiância solar.

Basicamente, existem dois tipos principais de estação solari-métrica: aquelas destinadas a estudos, pesquisa, desenvolvimento e calibração de modelos computacionais de levantamento solarimétrico e as estações automáticas que atendem aos requisitos estabelecidos pela EPE (EPE-DEE-RE-065/2013) para cadastramento e habilitação técnica com vistas

à participação nos leilões de energia. Conforme o regulamento da EPE, a estação solari-métrica deve possuir no mínimo os seguintes instrumentos:

- dois piranômetros sem seletividade espectral (instrumentos de segunda classe) ou superior, conforme a norma ISO 9060:1990, para a medição da irradiação global horizontal;
- um anemômetro (para a medição da velocidade do vento);
- um higrômetro (para a medição da umidade relativa do ar);
- um termômetro (para a medição da temperatura do ar).

Já as estações destinadas a estudos e desenvolvimento de modelos empregam, além dos piranômetros, para medição da

componente global da radiação, pirenômetros acoplados a um rastreador solar, para obtenção da componente direta normal da radiação solar incidente, e vários outros instrumentos de medida, tais como câmeras imageadoras do céu, para estudos sobre a nebulosidade, espectrofotômetros,

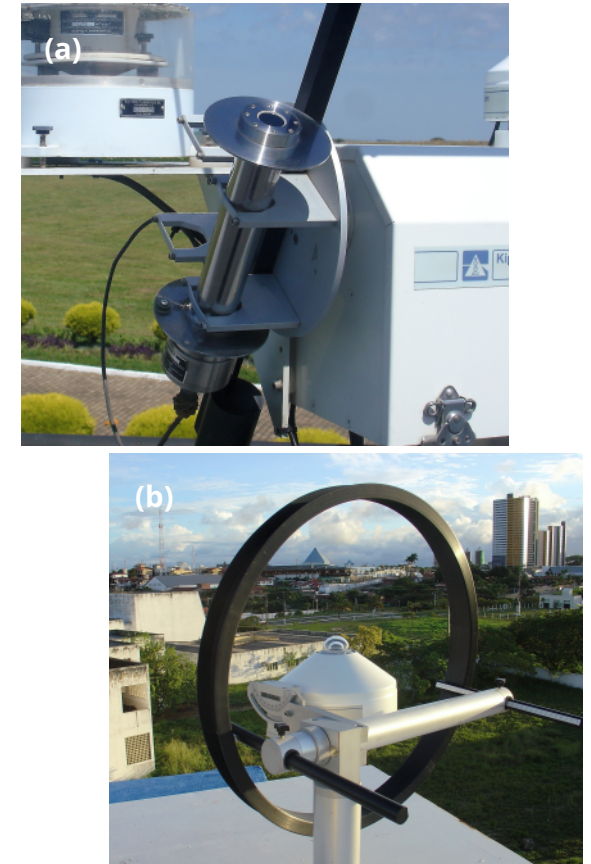


Figura 2.7 - Exemplos de processos de medição da radiação solar direta: (a) utilizando o pirenômetro (direta normal) e (b) utilizando o par de piranômetros, sendo um deles munido de um anel de sombreamento (o segundo piranômetro não aparece na imagem).

para estudos do espectro da radiação solar, fotômetros solares, para estudos sobre a composição da atmosfera (aerossóis, vapor d'água), entre outros. A **Figura 2.8** ilustra esses dois tipos de estações solarimétricas.

As incertezas das medições dos radiômetros resultam da qualidade das instalações, dos equipamentos, do local da instalação e das incertezas oriundas da operação destes no campo. A **Tabela 2.2** apresenta, de forma qualitativa, a relevância relativa das várias etapas de instalação, operação e manutenção de uma estação solarimétrica. Para fins de levantamento de recursos de energia solar para geração de energia elétrica, instrumentos de “primeira classe” ou “padrões secundários” devem ser utilizados apenas

se o projeto tiver recursos financeiros suficientes e de longo prazo para apoiar a operação e manutenção, necessárias para garantir a qualidade das medidas.

Geração de eletricidade a partir da energia solar

Duas tecnologias são utilizadas para conversão da energia solar em eletricidade: a conversão fotovoltaica (ou geração fotovoltaica) e a conversão térmica (ou geração heliotérmica). A primeira baseia-se no princípio físico conhecido como efeito fotovoltaico que é a produção de uma

Incertezas

A acurácia ou exatidão de um radiômetro indica o quanto as medidas realizadas aproximam do valor de referência e está relacionada com desvios sistemáticos, geralmente atribuídos a problemas de calibração. Por outro lado, a incerteza ou precisão está relacionada com o espalhamento das medidas em relação a um valor médio qualquer, relacionada a vários fatores instrumentais, ou a etapas de obtenção dos dados tais como a manutenção, presença de sujidades no domo, instabilidade estrutural da plataforma de coleta, etc. A imagem ao lado ilustra o conceito de acurácia e precisão em termos estatísticos. O centro do alvo representa o valor de referência da variável avaliada. Os pontos representam os valores observados para a mesma variável (Fonte: Martins e Pereira, 2019).

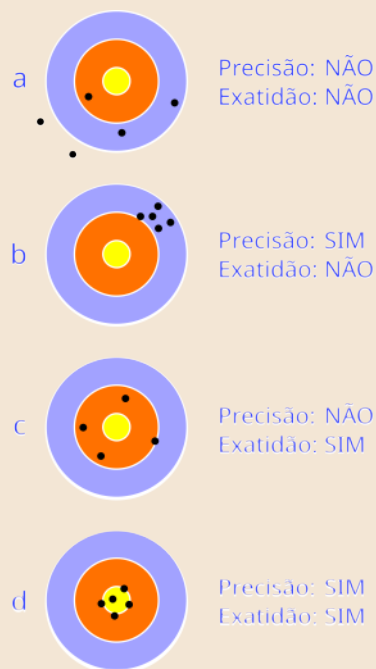


Figura 2.8 - Plataformas de coleta de dados solarimétricos: (a, b) plataformas destinadas a pesquisa, (c) plataforma que atende aos requisitos da EPE (2021).

Tabela 2.2 - Relevância relativa, de forma qualitativa, das várias etapas de instalação, operação e manutenção de uma estação solarimétrica.

Etapas	Importância Relativa		
	Maior	Média	Menor
Operação e Manutenção	■		
Controle de Qualidade	■		
Geração e Armazenamento de Metadados		■	
Escolha de Sensores		■	
Método de Instalação		■	
Escolha do Local		■	
Frequência de Amostragem		■	
Período de Campanha		■	
Calibração de Sensores			■
Aquisição dos Dados			■

corrente elétrica em um material semiconductor exposto à radiação eletromagnética, como as células de silício presentes nos módulos fotovoltaicos.

A conversão depende do material semiconductor empregado, caracterizado pela energia de criação dos pares de elétrons livres e lacunas (energia de banda proibida). Assim, a escolha da tecnologia para a produção dos módulos fotovoltaicos (silício mono ou poli cristalino, filmes finos, ou semicondutores orgânicos) está associada à resposta espectral e, também, ao espectro solar incidente. A [Figura 2.9](#) ilustra o efeito fotovoltaico em uma célula semicondutora que compõe um painel fotovoltaico. A eficiência de conversão da radiação solar em eletricidade das tecnologias disponíveis no mercado estão na ordem de 18 a 24%.

A geração fotovoltaica emprega a irradiação solar global incidente, ou seja, as componentes direta e difusa da radiação solar, inclusive a que provém do albedo da superfície, portanto, ocorre mesmo em dias com nebulosidade, embora com menor produtividade.

A geração fotovoltaica também sofre a influência da temperatura de operação da célula semicondutora. O aumento da temperatura causa a redução da eficiência de conversão fotovoltaica. Daí a importância dos dados de temperatura do local da instalação pretendida, uma vez que esta tem influência na temperatura de operação do módulo fotovoltaico.

A geração termossolar ou heliotérmica (CSP - *Concentrated Solar Power*) utiliza espelhos (heliostatos) que refletem a luz do Sol de modo a concentrar a incidência solar

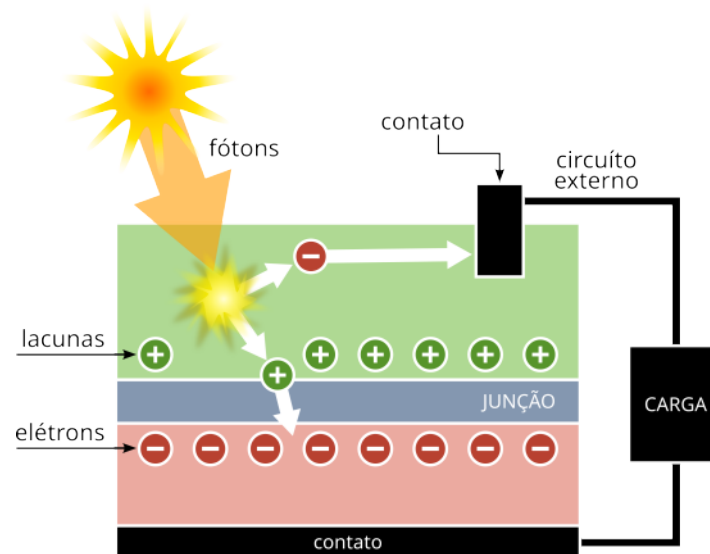


Figura 2.9 - Ilustração do efeito fotovoltaico sobre uma célula fotovoltaica. Fonte: Neves, 2021.

para conversão térmica. O calor aquece um fluido de trabalho que irá movimentar turbinas, acionando o gerador de eletricidade. Existem várias tipologias de geração termossolar, empregando espelhos parabólicos lineares, ou sistemas de vários espelhos planos em uma disposição própria para gerar calor em um único ponto. A [Figura 2.10](#) ilustra as principais tipologias de geração termossolar mais empregadas. A geração termossolar utiliza apenas a componente direta da irradiação solar incidente e, portanto, só pode ser aplicada em regiões com baixa nebulosidade e alta incidência de radiação solar como, por exemplo, em regiões áridas. Contudo, tem a vantagem de poder gerar energia elétrica mesmo após o pôr do Sol, desde que disponha de sistemas de armazenamento do calor gerado durante o dia.

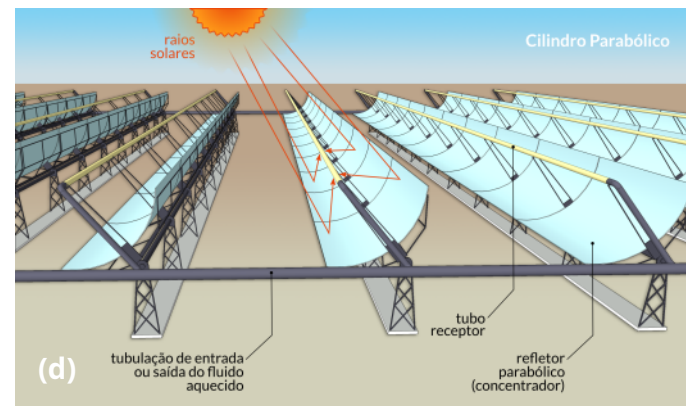
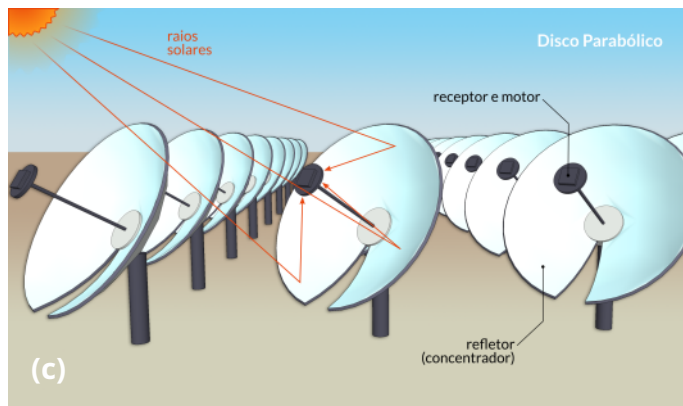
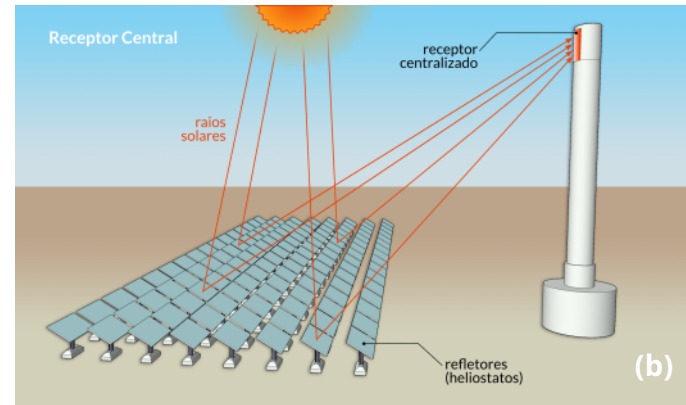
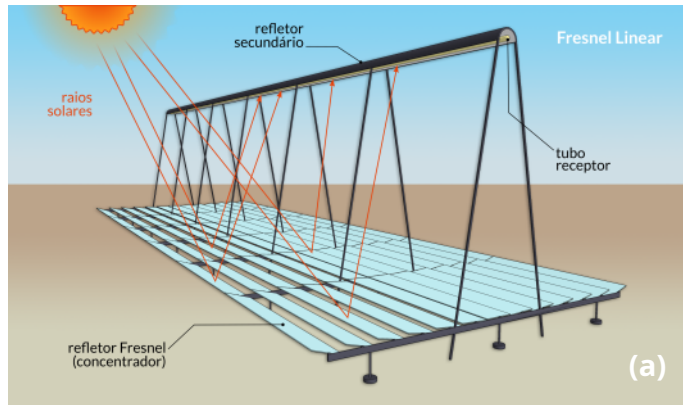


Figura 2.10 - Sistemas de geração heliotérmica: (a) por tecnologia de lente Fresnel, (b) empregando sistema de torre, (c) empregando disco parabólico, (d) empregando cilindro parabólico.



METODOLOGIA DE ELABORAÇÃO DO ATLAS

Para a elaboração do Atlas Solarimétrico da Paraíba, foi adotada metodologia inovadora que combina uso de dados climáticos e de sensoriamento remoto com modelo numérico de transferência radiativa adaptado para as condições ambientais encontradas no território nacional (Martins e Pereira, 2006; Martins et al., 2008; Costa et al., 2016; Pereira et al., 2017). Fruto de trabalho de pesquisa realizado ao longo das últimas décadas, o modelo de transferência radiativa BRASIL-SR, utilizado na confecção deste Atlas, emprega propriedades físicas da atmosfera e seus constituintes (temperatura do ar, umidade relativa, espessura óptica de aerossóis, concentração de gases atmosféricos, nebulosidade) para estimar o perfil vertical dos principais gases e partículas presentes na atmosfera baseado em técnicas consolidadas na literatura científica. Dados relacionados à cobertura e uso do solo (albedo e altitude) também são fundamentais para simular os processos físicos de atenuação da radiação solar e obtenção da irradiância solar incidente na superfície e refletida de volta para a atmosfera (Casagrande et al., 2021). As

informações sobre a nebulosidade presente na atmosfera, principal fator de modulação da incidência de radiação solar na superfície, são obtidas a partir de imagens de satélites geoestacionários da família GOES.

Os valores de irradiância solar incidente na superfície fornecidos pelo modelo BRASIL-SR para cada imagem de satélite são integrados numericamente para determinação dos totais diários para um período de 10 anos iniciado em 2012. As incertezas associadas à metodologia são avaliadas com uso de métricas estatísticas, como viés, raiz do erro quadrático médio e correlação de Pearson, determinadas com base na comparação entre valores estimados e observados em estações de medida em superfície.

A base de dados disponibilizada neste Atlas inclui as médias anual e mensal do total diário das seguintes componentes da irradiação solar incidente na superfície:

- Total diário da irradiação solar global incidente no plano horizontal (GHI);
- Total diário da irradiação solar global incidente no plano inclinado a 10° em

relação ao plano horizontal (GTI_{10});

- Total diário da irradiação solar difusa incidente no plano horizontal (DHI);
- Total diário da irradiação solar direta normal (DNI), i.e., incidente em superfície perpendicular à direção de propagação do feixe da energia solar.

Descrição do modelo BRASIL-SR

Os valores de irradiação solar produzidos pelo modelo BRASIL-SR são adotados como referência para o território brasileiro por instituições governamentais e empreendedores do setor de energia (CRESESB, 2022; SOLERGO, 2022).

O fluxo de operação do modelo pode ser visto da [Figura 3.1](#). O modelo espectral BRASIL-SR utiliza 37 intervalos espectrais distribuídos no intervalo entre 200 nm a 3700 nm. Os dados espectrais solares no topo da atmosfera (TOA) seguem Gueymard (2004).

Os perfis atmosféricos verticais de temperatura do ar, pressão atmosférica e concentração de gases seguem Anderson et al. (1986), e estão disponíveis para cinco atmosferas padrão selecionadas com base na temperatura da superfície. O coeficiente de absorção de radiação solar pelos gases vapor de água, O₃, CO₂, O₂ são calculados com base em métodos propostos por Wiscombe (1977), Schreier (2019) e Gordon (2017).

A condição de contorno de superfície é estabelecida com base no albedo espectral de superfície para radiação direta e difusa. As informações de albedo foram determinadas conforme descrito por Schaaf et al. (2002), com uso dos parâmetros do kernel BRDF derivados para o sensor MODIS nos satélites ACQUA e TERRA. Os parâmetros do kernel BRDF são interpolados linearmente para os 37 comprimentos de onda espectrais usados pelo modelo.

A base de dados de profundidade óptica dos aerossóis atmosféricos para o comprimento de onda 550 nm é interpolada para os 36 comprimentos de onda de intervalos espectrais restantes usando o expoente de Angström como parâmetro de entrada (Casagrande et al., 2021). A profundidade óptica de aerossóis é distribuída verticalmente em cada coluna da grade, assumindo profundidade óptica fixa de 0,0216 para alturas entre 5 km e 50 km. Abaixo de 5 km de altura, assume-se o decaimento exponencial da profundidade ótica com a altitude. A seleção das demais propriedades óticas do aerossol (albedo de espalhamento simples e fator de assimetria) é baseada no bioma predominante em cada célula da grade conforme descrito em (Darbyshire et al., 2018).

O modelo BRASIL-SR assume que as nuvens estão distribuídas em duas camadas atmosféricas do perfil vertical da atmosfera. As propriedades óticas das nuvens Stratocumulus foram utilizadas na elaboração do Atlas. A metodologia assume que em condição de céu totalmente encoberto não há incidência de irradiação direta na superfície.

Dados de entrada

O modelo de transferência radiativa BRASIL-SR requer um conjunto de dados meteorológicos e ambientais para a parametrização numérica dos processos radiativos na atmosfera. Este tópico descreve sucintamente as principais características das bases de dados utilizadas e o processamento necessário para organização e formatação exigida na automatização do procedimento de leitura dos dados e execução do modelo. Esse procedimento gerou a composição dos 10 anos de cálculo da irradiação solar incidente na superfície que integram o Atlas Solarimétrico da Paraíba. Todas as bases de dados empregadas foram produzidas por instituições de reconhecida competência acadêmica e amplamente utilizadas em diversas áreas das atividades humanas, incluindo o agronegócio e a energia (Casagrande et al., 2021).

Cobertura de nuvens

A nebulosidade é o principal fator de atenuação da irradiação solar incidente na superfície. Deste modo, fornecer informações de qualidade ao modelo BRASIL-SR sobre a nebulosidade presente em uma localidade é fundamental para obtenção de estimativas confiáveis e representativas dos valores observados em superfície (estimativas com baixa incerteza). Dados de qualidade sobre a nebulosidade em áreas de grande extensão territorial são obtidos a

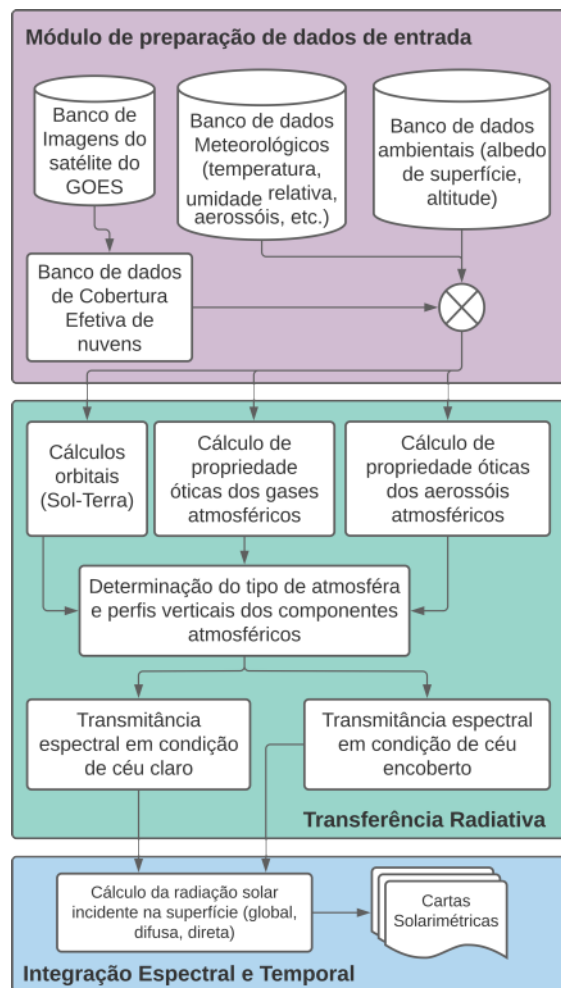


Figura 3.1 - Diagrama em blocos da metodologia empregada no Atlas Solarimétrico da Paraíba.

partir da análise de imagens na faixa espectral do visível obtidas por satélites geostacionários. O índice adimensional de cobertura efetiva de nuvens (C_{eff}) para cada píxel (elemento da imagem digital) é determinado a partir da equação

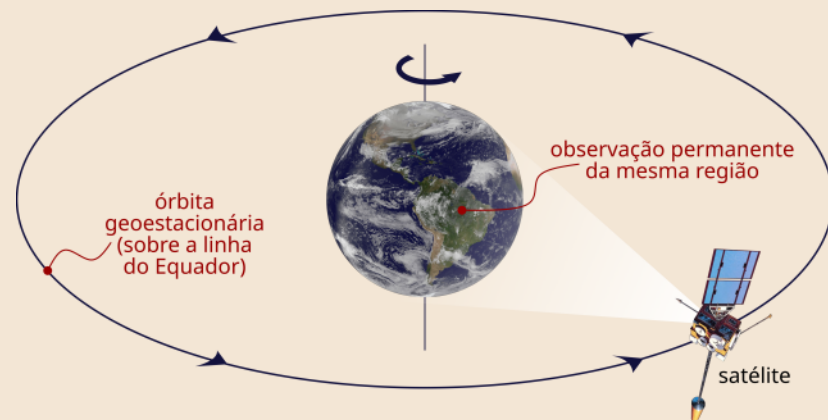
$$C_{eff} = \frac{L - L_{clear}}{L_{cloudy} - L_{clear}}$$

onde L representa o valor de radiância observado pelo satélite para um píxel específico da imagem. L_{clear} e L_{cloudy} representam os valores de radiância observados pelo satélite para o mesmo píxel quando este encontra-se na condição de céu claro e céu totalmente encoberto por nuvens, respectivamente. Os valores de L_{clear} e L_{cloudy} são determinados a partir de análise estatística de imagens de satélite obtidas em situações similares de geometria de iluminação do píxel pelo Sol, i.e., aproximadamente o mesmo ângulo zenital solar.

O índice de cobertura efetiva de nuvens foi determinado com base nas imagens do satélite geostacionário GOES 13 (já descomissionado), para o período entre 2012 e 2017, e do GOES 16, para o período restante, entre 2018 e 2021. As imagens no canal visível (comprimento de onda 0,64 μm) do satélite GOES 13 tem resolução espacial de 4 km. Sua resolução temporal (intervalo de aquisição de cada imagem) foi de 30 minutos.

O satélite GOES 16 substituiu o GOES 13 e é o primeiro da nova geração de satélites da família, com melhorias na resolução

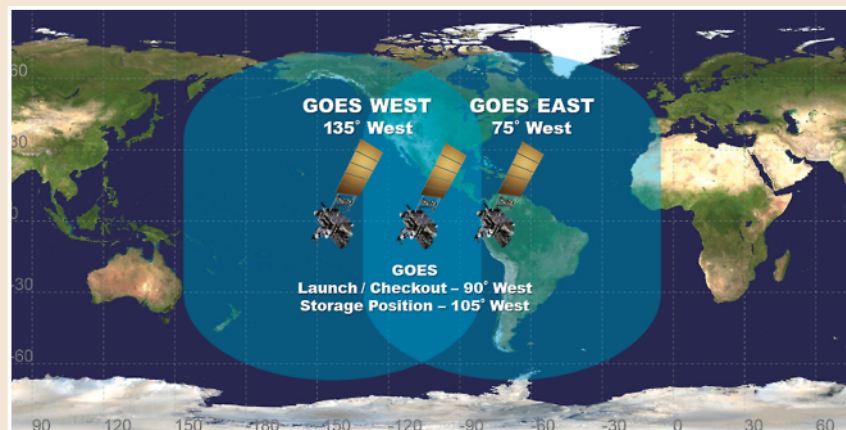
Satélites geostacionários



Os satélites geostacionários são usados para fornecer serviço contínuo de observação da Terra em uma grande área. A família de satélites GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) tem uma órbita geossíncrona no plano equatorial e com o mesmo período orbital que o período de rotação do planeta. A órbita geostacionária é um tipo de órbita geossíncrona com um recurso adicional. Ele permanece estacionário em relação a um único ponto na superfície do planeta. Os satélites estão posicionados a aproximadamente 36.000 km acima da superfície terrestre.

A NOAA/NASA (*National Oceanic and Atmospheric Administration / National Aeronautics and Space Administration*) opera os satélites da família GOES que apresentam a melhor geometria de observação do território brasileiro uma vez que permanecem posicionados sobre a linha do Equador no meridiano 75° Oeste.

A figura abaixo ilustra as áreas de abrangência dos satélites geostacionários da série GOES sobre as Américas.



Ozônio

O ozônio é o constituinte atmosférico responsável pela atenuação da radiação solar na faixa espectral do ultravioleta. A base de dados disponibilizada pelo *Copernicus Climate Change Service* (<https://climate.copernicus.eu/>) fornece a concentração de Ozônio na coluna atmosférica e foi utilizada para parametrização dos processos radiativos associados ao ozônio. Esta base apresenta resolução espacial de 1°, sendo por isso necessário processamento

de ajuste da base para a resolução espacial apresentada pelas imagens de satélite. O perfil vertical seguiu a atmosfera-padrão selecionada em função da temperatura do ar na superfície.

Albedo

Albedo ou coeficiente de reflexão é a razão entre a radiação refletida pela superfície e a radiação incidente sobre ela. Tem natureza adimensional, sendo normal-

Temperatura, umidade relativa e água precipitável

O modelo BRASIL-SR utiliza valores de temperatura do ar, umidade relativa e água precipitável para estabelecer os perfis verticais dos constituintes atmosféricos. Os valores de temperatura do ar são fundamentais para estabelecer os perfis verticais dos gases constituintes da atmosfera (Martins, 2001). Por outro lado, a água precipitável é uma variável de forte interação com a radiação solar e possui importante papel na atenuação da irradiação solar incidente na superfície, sendo os seus dados utilizados para corrigir o perfil de vapor de água na coluna atmosférica. Para elaboração do Atlas, os dados das três variáveis disponíveis na base de reanálise ERA-5 também foram interpolados com base no método do píxel vizinho mais próximo para a resolução espacial das imagens do satélite GOES. A reanálise ERA-5 é disponibilizada pela *Copernicus Climate Change Service* (<https://climate.copernicus.eu/>).

Tabela 3.1 - Frequência temporal de coleta de imagens ao longo do período de tempo adotado para elaboração do Atlas Solarimétrico da Paraíba.

Satélite	Extensão da Série Temporal	Resolução temporal	Resolução espacial
GOES -13	Abril de 2003 a dezembro de 2017	Duas imagens por hora	4 km
GOES -16	Janeiro de 2018 a Dezembro de 2021	Seis imagens por hora	1 km

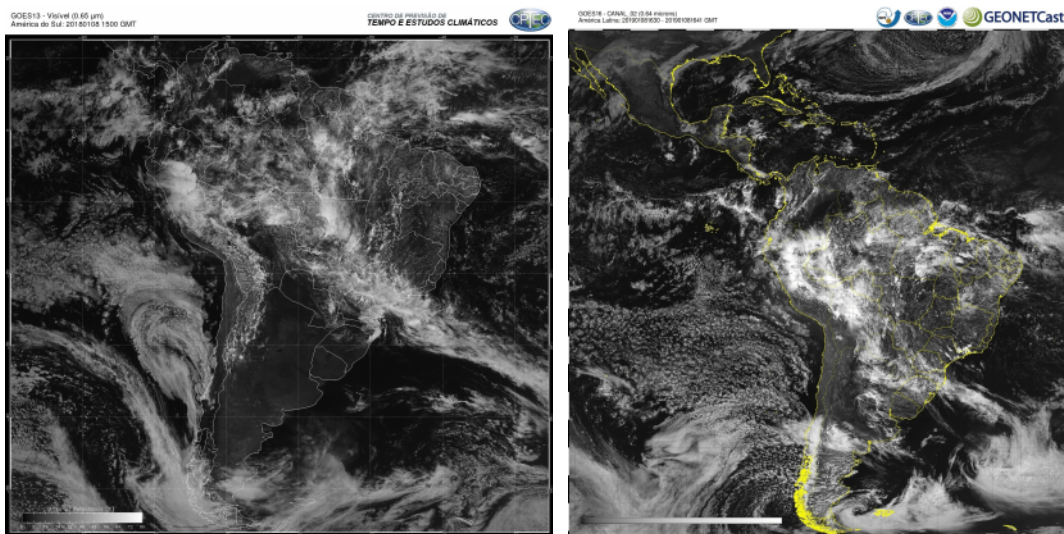


Figura 3.2 - Imagens no canal visível dos satélites GOES 13 (esquerda) e GOES 16 (direita), na projeção retangular. Fonte: DISSM/INPE.

mente medido numa escala que vai de zero a 1. A função de distribuição da reflectância bidirecional (FDRB) fornece a reflectância de um alvo em função da geometria de iluminação e geometria de visualização. As mudanças na reflectância e no albedo de uma determinada superfície têm relação com a sua geometria de iluminação e com o tipo de superfície, sendo distintas para diferentes comprimentos de onda. Uma das metodologias para descrever a variabilidade do albedo de superfície utiliza as funções de distribuição de reflectância bidirecional (FDRB), combinando parâmetros como o espalhamento isotrópico, espalhamento em superfícies horizontalmente homogêneas e espalhamento óptico geométrico. Seguindo estes princípios, o modelo BRASIL-SR utiliza dados de albedo espectral do solo para o cálculo da irradiação solar direta e difusa, obtida usando parâmetros das funções FDRB e fórmulas polinomiais com coeficientes independentes do comprimento de onda. Valores climatológicos mensais em sete bandas de comprimentos de onda foram interpolados linearmente para os 37 intervalos de comprimento de onda adotados no BRASIL-SR. A base de dados utilizados para este processamento está disponível para acesso público em <http://tds.webservice-energy.org>.

Altitude e biomas

O modelo também utiliza dados topográficos de altitude para correção e parametrização de algumas das variáveis atmosféricas utilizadas, além do mapa de

biomas para a seleção do conjunto de propriedades ópticas dos aerossóis, definida a partir do bioma principal de cada ponto de grade. A base de dados de altitude do território brasileiro utilizada é a GTOPO30, do *Earth Resources Observation and Science (EROS) Data Center/United States Geological Survey (USGS)*, disponível em formato de grade com resolução de arco de 30 seg (aproximadamente 1 km) e discretização vertical da ordem de 100 m. Já os dados de biomas são oriundos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), com escala de 1:250.000 (Figura 3.3). Assim como nos outros dados de entrada, os valores são interpolados para o tamanho do píxel da imagem de satélite utilizada.

Processamento computacional

O modelo BRASIL-SR foi executado para uma área limitada (domínio), conforme ilustrado na Figura 3.4, cobrindo uma região além das fronteiras do território do Estado da Paraíba com grade retangular na resolução horizontal de $0,04^\circ \times 0,04^\circ$ ($\sim 16 \text{ km}^2$). Este domínio compreende as latitudes entre $9,46^\circ$ sul e $5,54^\circ$ sul e longitudes entre $40,46^\circ$ oeste e $34,62^\circ$ oeste. Todo o conjunto de dados meteorológicos e ambientais utilizados para alimentar o modelo foi organizado para o domínio ilustrado na Figura 3.4, incluindo imagens de satélite, temperatura do ar,

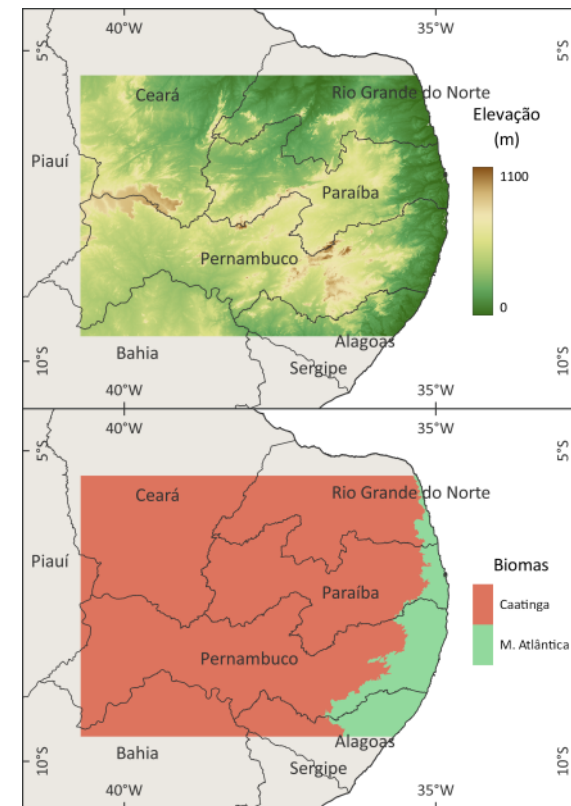


Figura 3.3 - Mapas de relevo (acima) e de biomas (abaixo) utilizados no modelo BRASIL-SR. Fonte: EROS/USGS e IBGE.

umidade relativa e espessura óptica de aerossóis.

A área do domínio foi definida com base na localização de estações de superfície com disponibilidade de dados solarimétricos para avaliação das incertezas das estimativas de irradiação solar incidente na superfície produzidas pelo modelo. Dados solarimétricos observados no território paraibano e estados vizinhos foram selecionados para garantir representatividade das áreas de fronteiras do estado e possibilitar uma avaliação rigorosa do desem-

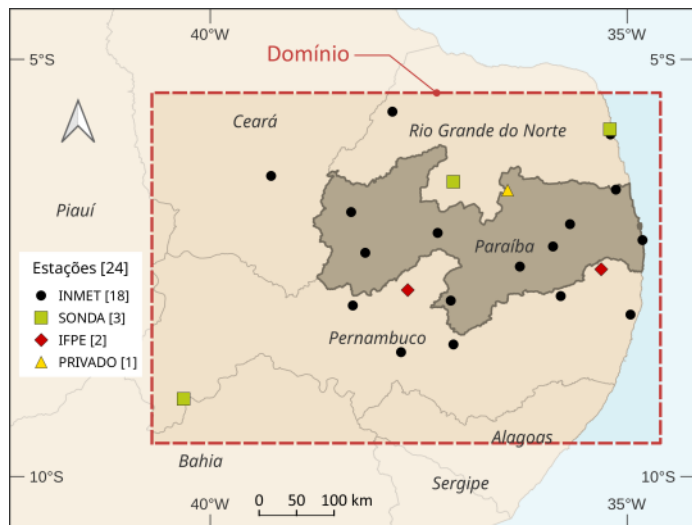


Figura 3.4 - A área tracejada em vermelho representa a região adotada na configuração do modelo BRASIL-SR para obtenção de estimativas de total diário de irradiação solar incidente na superfície. Os pontos indicam a localização das estações de superfície.

penho do modelo BRASIL-SR em toda extensão do estado da Paraíba. A base de dados observados inclui um conjunto de estações públicas administradas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Instituto Federal de Pernambuco (IFPE) e uma estação privada de coleta de dados gentilmente cedida pela Casa dos Ventos.

A elaboração do mapeamento do recurso solar apresentado neste documento teve elevada demanda computacional em função da extensão do território paraibano, da quantidade de informações armazenadas nas bases de dados meteorológicos e ambientais e das imagens de satélite utilizadas para alimentar o modelo. O modelo foi executado para um período de 120 meses (10 anos) de

modo que a demanda computacional atendeu a realização das seguintes etapas:

- i. Pré-processamento e armazenamento das imagens de satélite para a área de domínio;
- ii. Determinação da cobertura de nuvens para cada imagem de satélite armazenada;
- iii. Transferência e processamento dos dados meteorológicos e ambientais para a grade retangular do domínio utilizado;
- iv. Execução do modelo alimentado com as bases de dados preparadas e armazenadas nas etapas anteriores;
- v. Pós-processamento das estimativas produzidas com determinação de valores médios mensais e anual dos totais diários de irradiação solar no território paraibano.

Todas estas etapas listadas foram processadas em nuvem, com a utilização do serviço *Amazon Elastic Compute Cloud* (Amazon EC2), comercializado pela *Amazon Web Services* (AWS). Para maior eficiência computacional, foi escolhida uma instância do tipo T3a – instância de uso geral expansível projetada para aplicações que enfrentam picos temporários de uso de CPU. A infraestrutura contratada contou com 8 CPUs virtuais (processadores AMD EPYC série 7000 de 2,5 GHz) e 32 GB de memória RAM, conectados a um SSD (*drive* de armazenamento de estado sólido) de uso geral com capacidade de 100 GB para carregamento rápido do sistema

operacional e bibliotecas, bem como um HD (disco rígido) otimizado para entrada/saída com capacidade de 1 TB para armazenamento dos dados de entrada e saída do modelo.

Todos os pacotes computacionais de apoio ao modelo (incluindo bibliotecas científicas de acesso livre, como NetCDF e HDF5) foram recompilados para otimizar seu desempenho para os processadores disponíveis na instância. Foram utilizados os compiladores do pacote Intel OneAPI (versão 2022.1.0) para garantir a compatibilidade com o modelo BRASIL-SR e o máximo desempenho das aplicações.

O volume final da base de dados de entrada (calculado após o pré-processamento, que redimensiona os dados para a grade do domínio e compacta os arquivos gerados) apresentou tamanho aproximado de 27 GB. O processamento propriamente dito ocupou um total de aproximadamente 576 horas-máquina com a utilização dos 8 núcleos em tempo integral, não incluindo rodadas para teste, avaliação e ajuste das configurações do modelo, nem o download e pré-processamento dos dados de entrada. Ao final das rodadas, foram gerados 297 GB de dados de saída do modelo, dos quais 283 GB compreendem dados de alta resolução ($0,01^\circ \times 0,01^\circ$).

Validação e análise de incertezas

Modelos atmosféricos ou satelitais são ferramentas úteis ao mapeamento de recurso solar em alta resolução, porém é

Estações solarimétricas

As estações meteorológicas automáticas do INMET atendem ao padrão do sistema de observação meteorológica mundial da *Global Observing System/World Meteorological Organization* (GOS/WMO) e possuem diversos sensores medindo pressão atmosférica, temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, direção e velocidade do vento, entre outras. Cada estação possui um piranômetro de segunda classe (ISO 9060:2018). Essas estações operam de modo autônomo e, muitas vezes, apresentam limitações de manutenção preventiva e limpeza frequente dos domos dos piranômetros, o que acarreta um maior percentual de dados excluídos durante a qualificação. No entanto, trata-se da mais abrangente base de medições radiométricas disponível no país.



Exemplo de estação padrão INMET.

As estações da Rede SONDA focam na coleta e disseminação de dados ambientais para fomentar a expansão das fontes solar e eólica no país. Suas plataformas solarimétricas seguem o padrão da *Baseline Surface Radiation Network* (BSRN) e utilizam sensores radiométricos de primeira classe, conforme requisitos da norma ISO 9060:2018. As estações SONDA possuem uma gama maior de sensores compreendendo tipicamente rastreadores solares com medição das componentes direta normal (DNI) e difusa (DHI) da irradiância solar, podendo incluir ainda pirgeômetros, sensor PAR, luxímetro, câmeras *all-sky*, fotômetros solares e espectroradiômetros.



Exemplo de estação padrão BSRN.

A base de dados cedida pela Casa dos Ventos foi obtida com a operação de uma estação que atende o padrão EPE (DEE-RE-065/2013). As estações padrão EPE possuem, minimamente, dois piranômetros de segunda classe "Spectrally Flat" ou superior, em conformidade com a norma ISO 9060:2018, garantindo redundância para medição da irradiação global horizontal, além de medição de umidade relativa do ar, temperatura e velocidade do vento.



Exemplo de estação padrão EPE.

necessário que as incertezas sejam quantificadas, pois impactam o risco de um empreendimento. A validação da modelagem utilizada para este Atlas consistiu na comparação das estimativas dos totais diários de irradiação solar, em suas componentes global horizontal (GHI) e direta normal (DNI), fornecidas pelo modelo satelital, com uma base de dados observados coletados em estações de medição em superfície. Esses dados não foram utilizados para ajustes estatísticos das saídas do modelo BRASIL-SR, o que assegura que os erros auferidos são representativos para todo o estado da Paraíba.

Para o procedimento de validação foram utilizadas 24 estações de coleta de dados em superfície pertencentes a centros meteorológicos, instituições de ensino e pesquisa e empreendedores privados com intuito de garantir abrangência e representatividade espacial do estado da Paraíba e entornos. Após processo de controle de qualidade, descrito no subtítulo a seguir, foram selecionadas 24 estações com medições confiáveis de irradiação solar global, das quais 4 possuem registro de dados de irradiância direta:

- 18 (dezoito) estações meteorológicas automáticas operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) contendo registros horários de irradiação solar global horizontal. Os dados são disponibilizados pelo portal <<https://portal.inmet.gov.br/>> e possuem acesso público;
- 2 (duas) estações solarimétricas pertencentes à Rede Solarimétrica de Pernam-

buco, operadas pelo Instituto Federal de Pernambuco (IFPE). Os dados, de acesso público, podem ser acessados no portal <<https://redesolpe.com.br/>>;

- 3 (três) estações solarimétricas pertencentes à Rede SONDA operadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e localizadas em Petrolina/PE, Caicó/RN e Natal/RN, com registros a cada minuto de irradiância solar global horizontal, difusa horizontal e direta normal (exceto Natal/RN). Todas as estações têm dados de acesso público pelo portal <<http://sonda.ccst.inpe.br/>>;
- 1 (uma) estação solarimétrica padrão EPE localizada na mesorregião Campina Grande, Estado da Paraíba, pertencente a empreendedores privados.

Controle de qualidade

É comum que medições solarimétricas apresentem falhas e problemas de qualidade ao longo dos anos, o que demanda um controle de qualidade das bases de dados observados antes de sua utilização na avaliação de incertezas de estimativas de irradiação solar incidente na superfície fornecidas por modelos computacionais. Além do acúmulo de sujeira nos radiômetros, que é bastante comum, a regularidade na calibração, os erros de conversão de sinal e a interferência causada por obstáculos são alguns dos problemas mais frequentes.

O controle de qualidade realizado atendeu aos critérios recomendados internacionalmente pela BSRN (*Baseline Surface Radiation Network*) combinados a outros documentos técnico-científicos (Gueymard, 2014; WMO no. 8, 2018). O algoritmo foi dividido em quatro etapas gradativamente mais rigorosas, além de uma análise de consistência prévia. Como todo processo automatizado de qualificação está sujeito a falhas, procedeu-se também a inspeção visual para aprovação final das medições. A **Figura 3.5** ilustra graficamente, em diagrama de blocos, este procedimento, enquanto a **Tabela 3.2** mostra o percentual total de dados aprovados para as variáveis GHI e DNI.

Métricas estatísticas

As comparações entre o modelo e as medições em superfície foram efetuadas para cada estação individualmente e para todo o conjunto de dados disponível. Empregaram-se métricas estatísticas convencionais definidas pelo Erro Médio (*viés*) e a Raiz do Erro Quadrático Médio (*REQM*). O *viés* indica tendências do modelo em superestimar

(valores positivos) ou subestimar (valores negativos) o potencial solar no local, enquanto o *REQM* é uma medida do espalhamento entre os dados medidos e os dados estimados pelo modelo de modo que quanto menores forem os valores, melhor o seu desempenho. A correlação de Pearson (*r*) é um teste que mede a relação estatística entre as irradiações estimadas pelo modelo e os valores observados nas estações de superfície. Espera-se uma associação linear entre os dois conjuntos de valores, de modo que os valores de *r* devem estar próximos a 1,0 (um). As **Equações 1, 2 e 3** detalham estes índices.

$$viés = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i) \quad (\text{Eq. 1})$$

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x}_i)(y_i - \bar{y}_i)]}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}} \quad (\text{Eq. 3})$$

onde y_i é o valor observado da variável no i -ésimo instante do tempo, x_i é o valor da

Tabela 3.2 - Percentual total de dados aprovados para as variáveis GHI e DNI após processo de qualificação considerando o total de estações avaliadas.

Variável	Extensão da série temporal (em dias)	Número de dias aprovados	Percentual aprovado
GHI	49250	35048	71,2%
DNI	11750	7347	62,5%

mesma variável produzida pelo modelo correspondente ao mesmo instante de tempo do valor observado, e N é o número de registros da variável em validação.

Deve-se considerar que valores elevados dos desvios de *viés* e *REQM* obtidos para algumas estações não estão relacionados somente às incertezas da modelagem, mas também às incertezas da própria medição em superfície. Problemas relacionados a sujidade, a calibração dos sensores e até mesmo efeitos de sombreamento por localização inadequada da estação, são difíceis de se detectar e, muitas vezes, passam despercebidas pelo controle de qualidade aplicado aos dados observados, até mesmo por inspeção visual. Neste sentido é recomendável avaliar os erros sempre que possível para um conjunto maior de estações, de modo a reduzir a

relevância das incertezas de medição.

As Tabelas 3.3 e 3.4 mostram um resumo das métricas de validação obtidas para as variáveis GHI e DNI respectivamente, para todas as estações selecionadas no domínio mapeado.

Os valores percentuais do *viés* e de *REQM* foram determinados em relação ao valor médio das observações nas estações selecionadas para o processo de validação.

Os percentis apresentados fornecem informações sobre a fração de observações (ou de desvios) que estão abaixo de seu valor, apurados em uma base mensal. Assim, por exemplo, o Percentil 25, ou P_{25} representa o limite superior de 25% dos registros presentes na análise estatística, e assim por diante.

Os desvios de cada estação possuem o mesmo peso na apuração dos percentis e nas médias finais. A média se refere à média aritmética de todas as 24 estações empregadas no processo de validação que passaram no controle de qualidade. Não há ponderação pelo período de dados.

Comparação entre bases solarimétricas

Diversas bases de dados solarimétricos estão disponíveis, regional, nacional e globalmente, oriundas de diferentes métodos como a interpolação entre estações de superfície, modelagem dinâmica em mesoescala ou global (reanálises) e modelos satelitais. A base de dados do Atlas

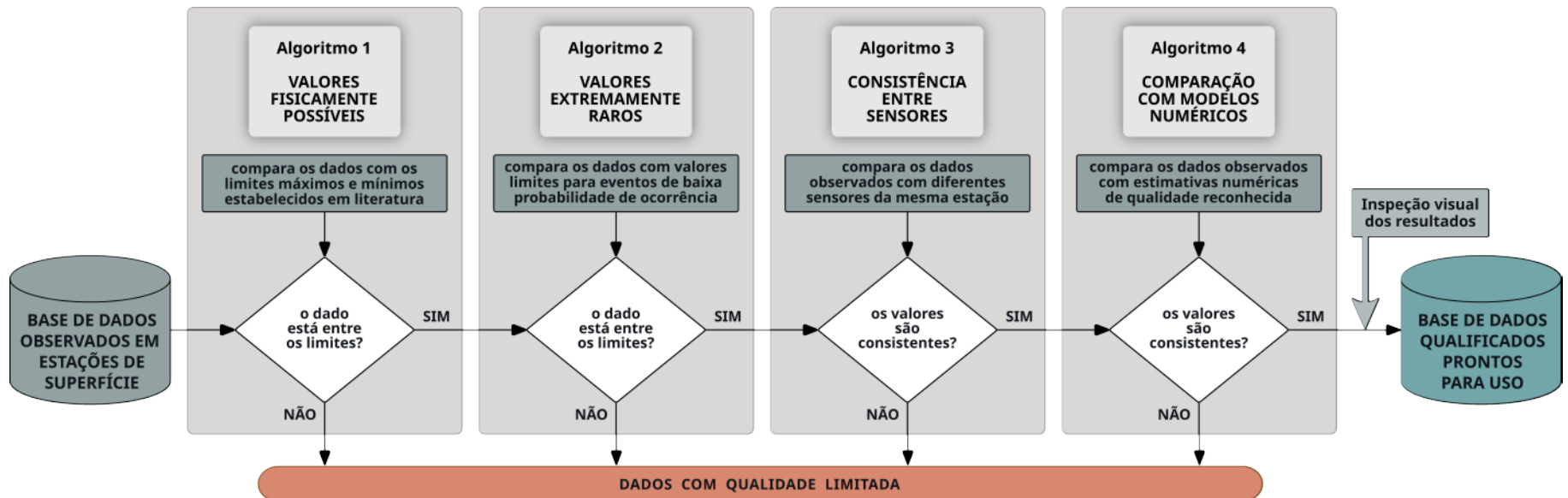


Figura 3.5 - Fluxograma do processo de qualificação de medições solarimétricas adotado neste atlas.

Métricas GHI	Média Observada (Wh/m ²)	Viés (Wh/m ²)	Viés (%)	REQM (Wh/m ²)	REQM (%)	Correlação (r)
Máximo	6096	386	7,1%	454	8,8%	0,98
Média	5551	105	2,0%	284	5,2%	0,96
Mínimo	4973	-281	-4,7%	178	3,1%	0,75
P75	5785	256	4,6%	339	6,1%	0,98
P50	5522	109	2,0%	255	4,7%	0,97
P25	5354	4	0,0%	226	3,8%	0,95

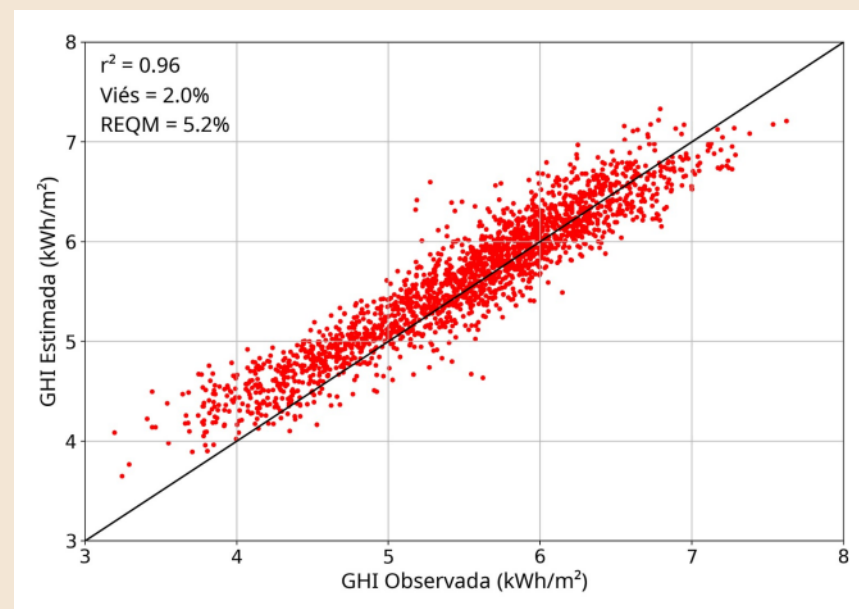
Tabela 3.3 - Métricas de validação das saídas do modelo para os totais diários de irradiação global horizontal.

Tabela 3.4 - Métricas de validação das saídas do modelo para os totais diários de irradiação direta normal.

Métricas DNI	Média Observada (Wh/m ²)	Viés (Wh/m ²)	Viés (%)	REQM (Wh/m ²)	REQM (%)	Correlação (r)
Média	5391	140	3,6%	590	11,5%	0,91
P50	5459	220	4,0%	554	11,0%	0,93

Diagrama de dispersão

Na ilustração ao lado, é apresentado um diagrama de dispersão entre as médias mensais de totais diários de GHI observados (abscissas) e estimados (ordenadas) para todas as estações analisadas. Nota-se uma correlação linear elevada ($> 0,95$) e um o viés relativo médio de 2%. O REQM relativo se encontra em 5,2%. Estas métricas estão compatíveis com as incertezas de modelos de estimativas satelitais. O pequeno viés positivo é adequado pois há de se considerar que parte das medições pode ser ligeiramente subestimada por sujidade dos domos devido à manutenção pouco frequente.



Solarimétrico da Paraíba (Paraíba, 2023) foi desenvolvida e validada utilizando o modelo satelital BRASIL-SR, mesma ferramenta amplamente difundida através do Atlas Brasileiro de Energia Solar (Brasil, 2017). Convém, no entanto, destacar que estas bases possuem diferentes características, conforme destacado na [Tabela 3.5](#).

A versão 2.0 do modelo BRASIL-SR trouxe importantes melhorias nos algoritmos de céu-claro, nas funções de refletância de superfície e na detecção de nebulosidade esparsa em dias secos. Além disso, parâmetros para transmitância de nuvem foram ajustados especificamente para a região de interesse. Para ilustrar as diferenças de desempenho e mostrar a importância de uma modelagem solar regionalizada, a [Figura 3.6](#) apresenta uma comparação dos resultados deste Atlas (Atlas PB) com aqueles da base de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar (Atlas BR) para um subconjunto de medições de elevada confiabilidade. Nota-se pela [Figura 3.6](#) que o viés médio do Atlas PB ficou em $-0,09 \text{ kWh/m}^2$ ante $-0,18 \text{ kWh/m}^2$ para o Atlas BR. Isso ocorre devido à versão melhorada do modelo BRASIL-SR e aos ajustes de parametrização específicos para o estado. Isto fez com que a correção de viés fosse dispensável, pois a incerteza das estimativas ficou próxima das incertezas das próprias medições de campo. Conclui-se que este Atlas apresenta uma maior confiabilidade para as estimativas de radiação solar para o Estado da Paraíba.

Tabela 3.5 - Principais diferenças entre as bases de dados geradas para o Atlas Solarimétrico da Paraíba (2023) e o Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017).

	Atlas Brasil 2017	Atlas Paraíba 2023
Período	1999 a 2015	2012 a 2021
Modelo / Versão	BRASIL-SR 1.2	BRASIL-SR 2.0
Resolução Espacial	4 km	4 km / 1 km
Correção de viés	Sim	Não
Estações utilizadas	493 estações	24 estações

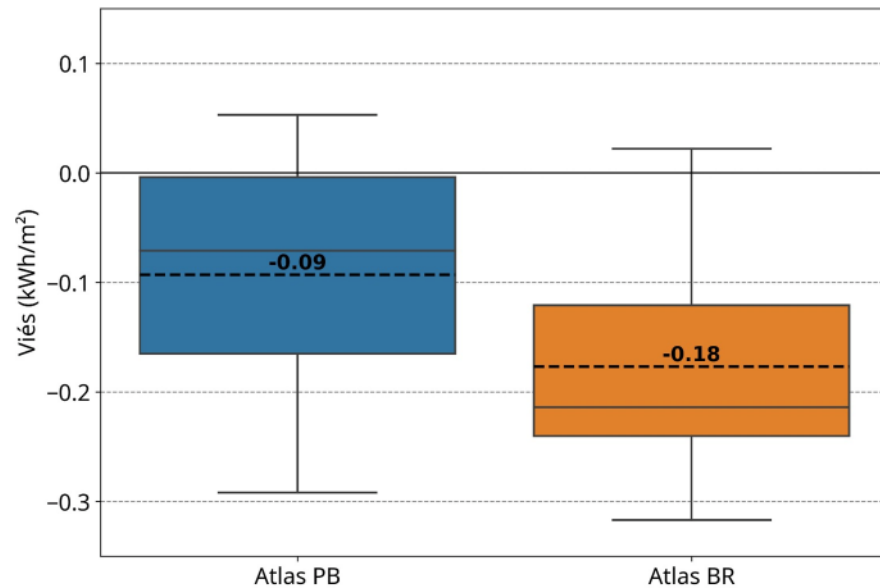


Figura 3.6 - Diferenças de viés entre as bases solarimétricas do Brasil-2017 (Atlas BR) e da Paraíba-2023 (Atlas PB) para o subconjunto de medições de elevada confiabilidade. São mostrados os limites máximos e mínimos, a mediana (linha cheia) e o intervalo interquartil (caixas). As médias (linha tracejada) acompanham os rótulos de valores.



CARTAS SOLARIMÉTRICAS

As cartas solarimétricas foram produzidas a partir dos resultados das simulações do modelo BRASIL-SR para um período entre janeiro de 2012 a dezembro de 2021. Cada uma das componentes da irradiação solar incidente na superfície é apresentada por um mapa da média anual do total diário, sempre seguido de doze mapas com valores médios mensais do total diário. A sequência de apresentação das cartas segue: irradiação global no plano horizontal (GHI), irradiação global no plano inclinado a 10° em relação ao plano horizontal (GTI_{10}), irradiação direta normal à superfície (DNI) e irradiação difusa no plano horizontal (DHI).

Os mapas destacam maior incidência de energia solar no oeste do estado paraibano, com valores médios para GHI de até $6,2 \text{ kWh/m}^2$ por dia. O Brejo Paraibano, localizado entre as Regiões Imediatas de Campina Grande e Guarabira (ver [Figura 1.1](#)), apresentou a menor incidência de energia solar na superfície (com valores de GHI de aproximadamente 5 kWh/m^2 .dia), mas ainda superior à

média determinada em estudos anteriores (Pereira et al., 2017) para a irradiação solar GHI no território brasileiro (cerca de $4,8 \text{ kWh/m}^2$.dia).

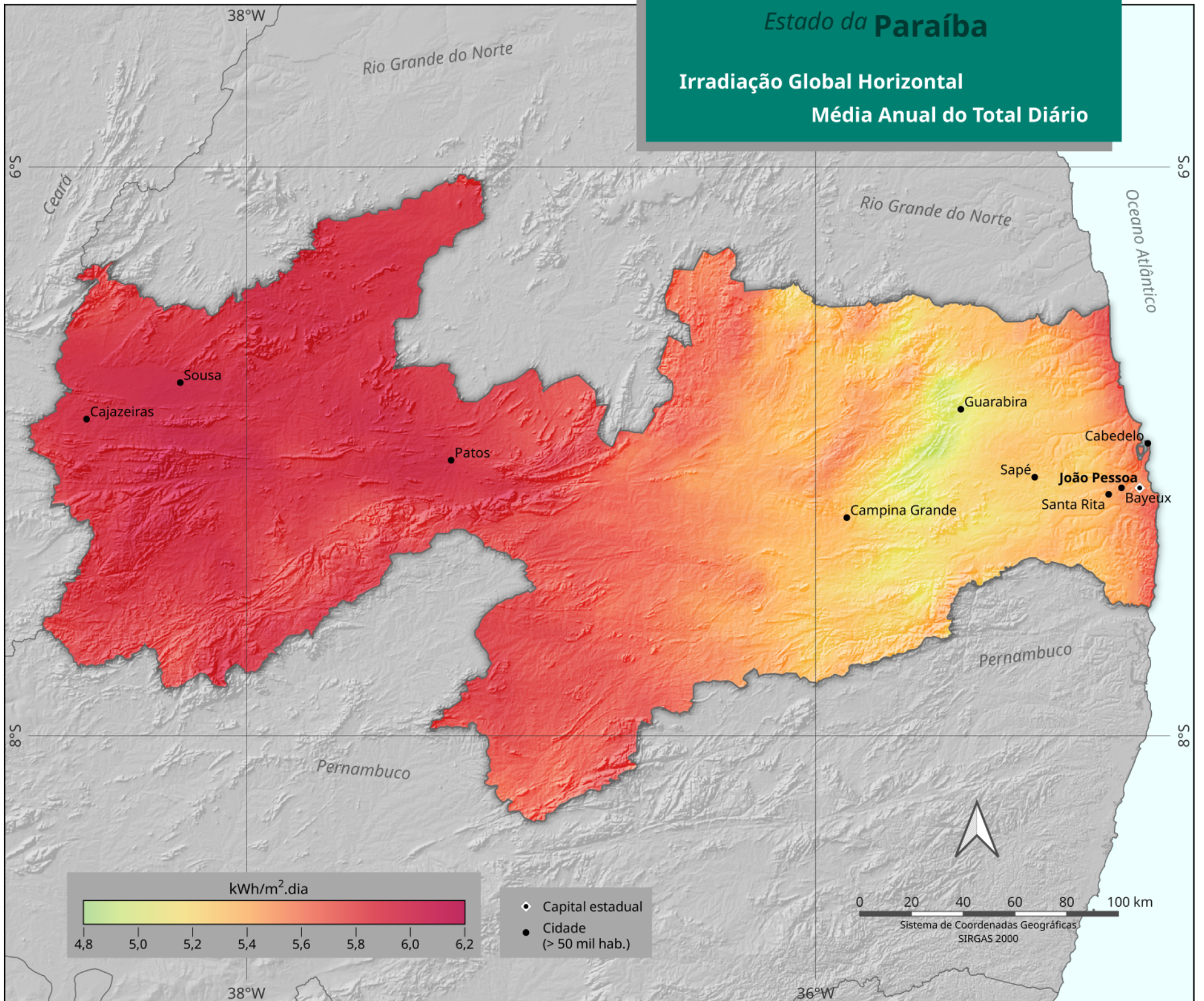
Os mapas também possibilitam identificar a variabilidade sazonal da incidência de energia solar no território paraibano. O recurso energético solar cresce a partir de julho, atingindo valores máximos em novembro, quando a componente GHI na superfície atinge valores de até 7 kWh/m^2 .dia. A incidência mínima de energia solar no território paraibano acontece em junho, quando os maiores valores de GHI observados no oeste do estado são da ordem de $5,5 \text{ kWh/m}^2$. Importante lembrar das informações apresentadas no segundo capítulo deste Atlas sobre o ciclo sazonal de precipitação no estado - onde o período chuvoso ocorre principalmente entre os meses de fevereiro a junho, conforme a região do estado.

As cartas solarimétricas foram elaboradas com uma resolução espacial da ordem de 16 km^2 , possibilitando um detalhamento espacial da informação sobre a radiação solar incidente na região. Isto é extre-

mamente relevante para empreendedores do setor de energia e demais interessados em conhecer a disponibilidade deste recurso no Estado da Paraíba. O acesso a esse detalhamento está disponível na Ferramenta Web disponibilizada pela Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos do Estado da Paraíba, onde além de verificar valores anuais e mensais do recurso solar, o usuário pode fazer simulações básicas e conhecer o potencial estimado para a geração de eletricidade com aproveitamento da energia solar em pontos ou mesmo em áreas de interesse. No entanto, é importante destacar que a Ferramenta Web não pode ser utilizada para o dimensionamento de sistemas de geração solar, uma vez que a implementação destes sistemas requer a elaboração do projeto executivo por profissionais qualificados para garantir atendimento dos requisitos técnicos específicos associados às características do local de instalação (eventuais sombreamentos, geometria de iluminação, infraestrutura de suporte dos módulos fotovoltaicos, etc.) e estabelecidos em normativas publicadas pela concessionária de energia.

Estado da Paraíba

Irradiação Global Horizontal Média Anual do Total Diário



38°W

Rio Grande do Norte

6°S

Ceará

6°S

Oceano Atlântico

Rio Grande do Norte

Sousa

Cajazeiras

Patos

Guarabira

Cabedelo

Sapé

João Pessoa

Santa Rita

Bayeux

Campina Grande

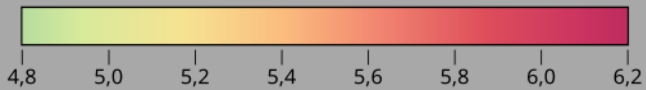
Pernambuco

8°S

Pernambuco

8°S

kWh/m².dia



- Capital estadual
- Cidade (> 50 mil hab.)

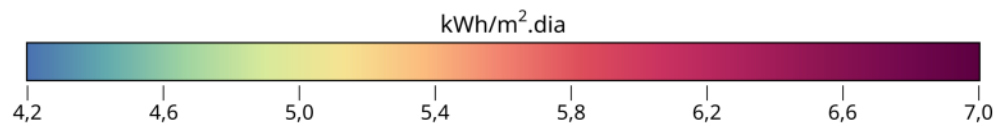
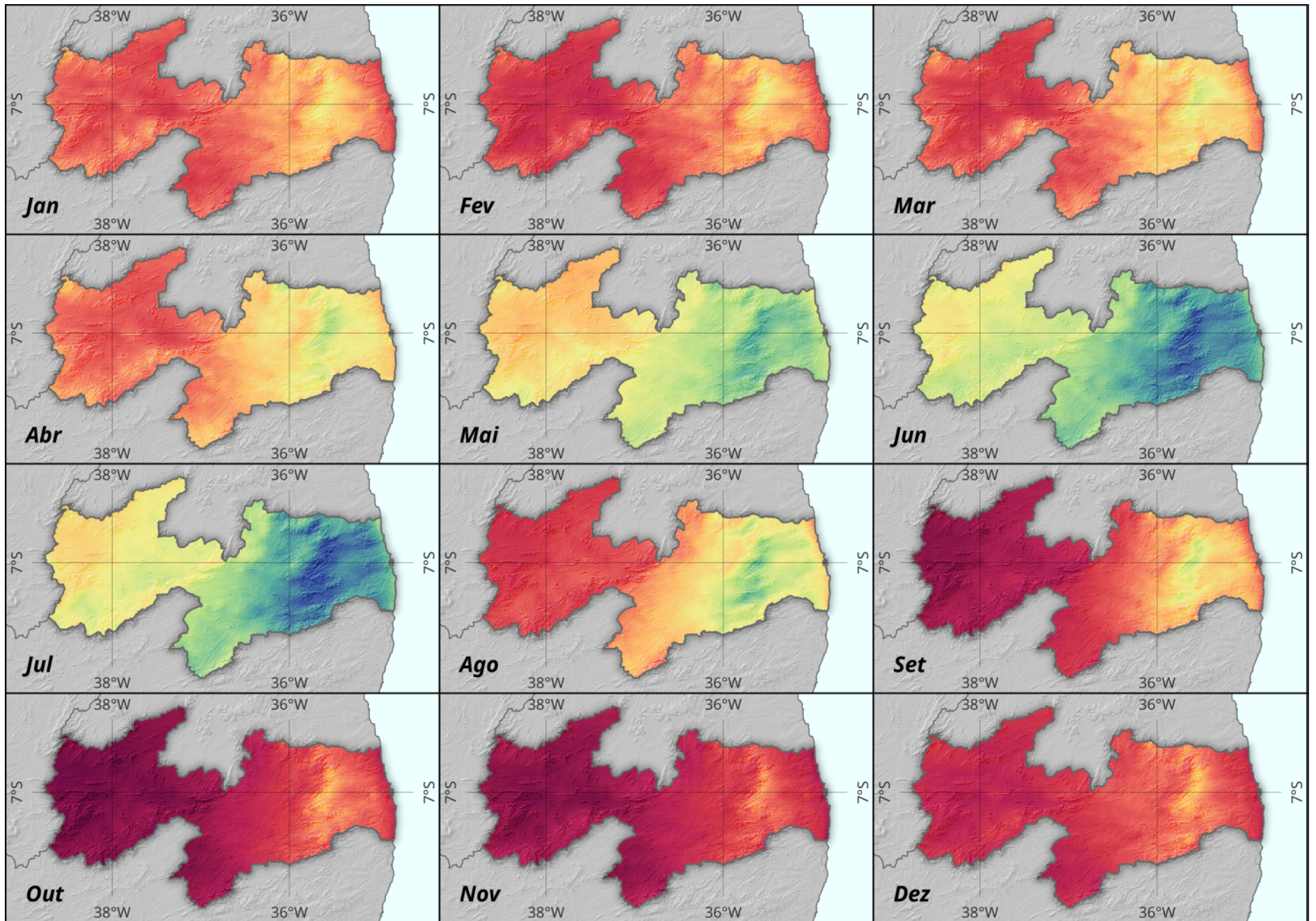


0 20 40 60 80 100 km

Sistema de Coordenadas Geográficas
SIRGAS 2000

38°W

36°W



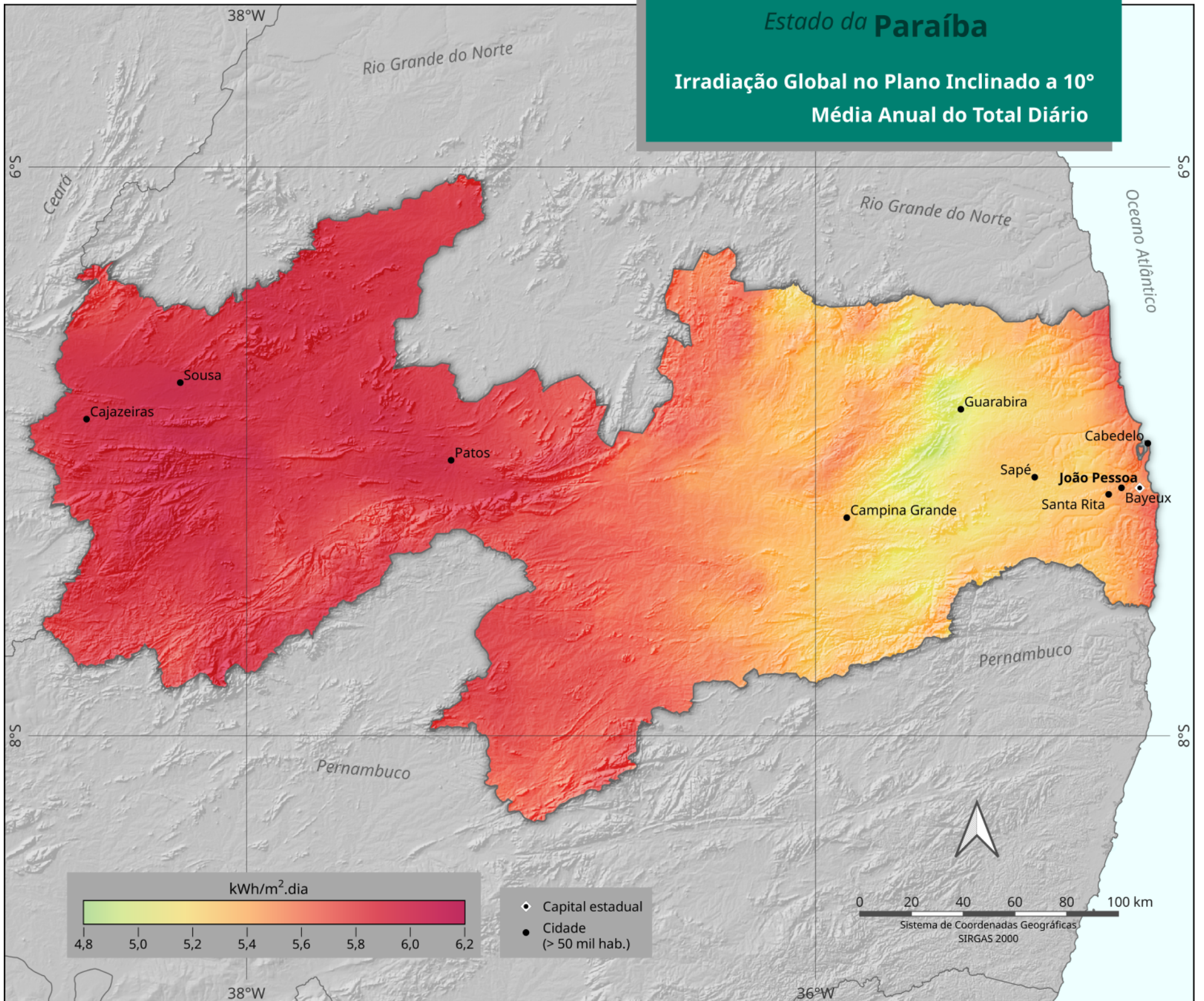
Sistema de Coordenadas Geográficas
SIRGAS 2000

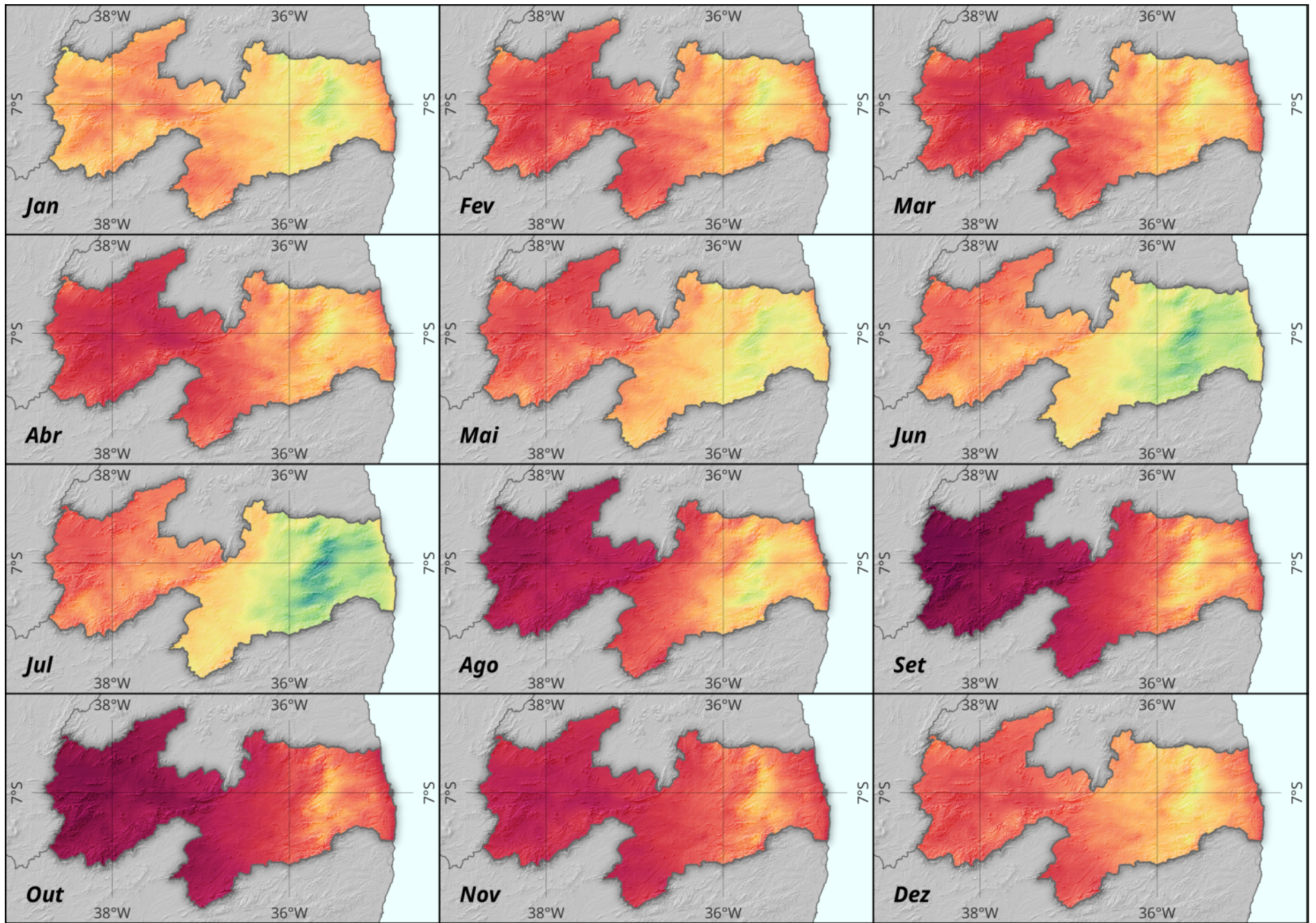
Estado da **Paraíba**

Irradiação Global Horizontal
Média Mensal do Total Diário

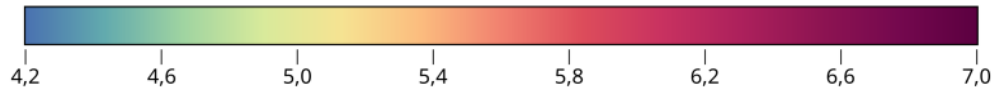
Estado da Paraíba

Irradiação Global no Plano Inclinado a 10° Média Anual do Total Diário





kWh/m².dia



0 50 100 150 200 250 300 350 km

Sistema de Coordenadas Geográficas
SIRGAS 2000

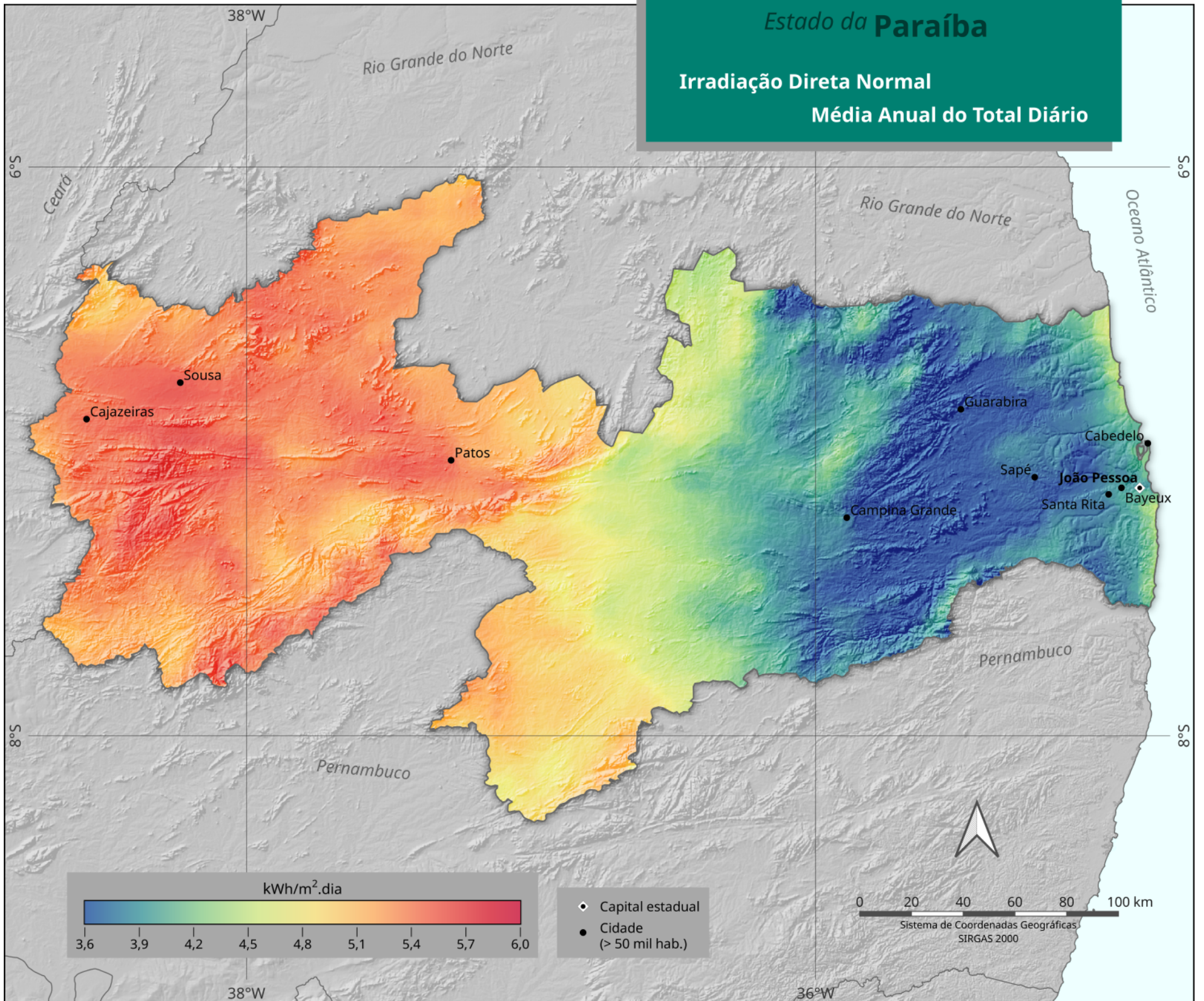
Estado da **Paraíba**

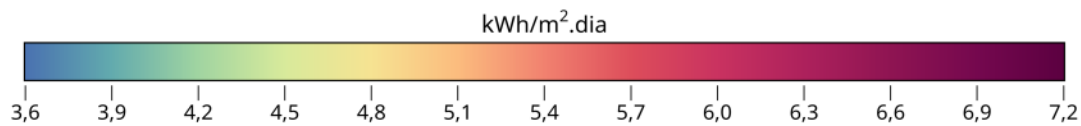
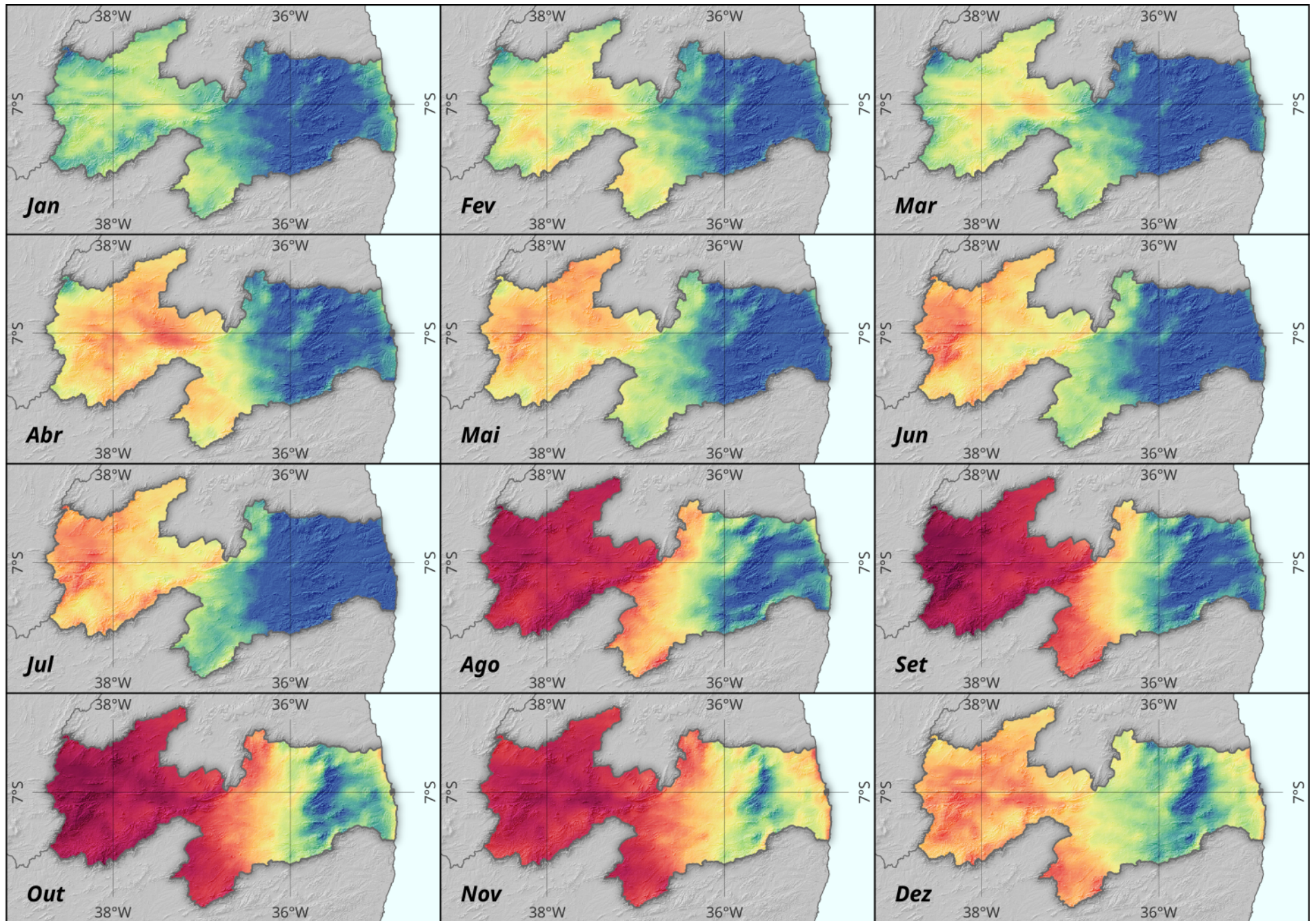
**Irradiação Global no Plano Inclinado a 10°
Média Mensal do Total Diário**

Estado da Paraíba

Irradiação Direta Normal

Média Anual do Total Diário





Sistema de Coordenadas Geográficas
SIRGAS 2000

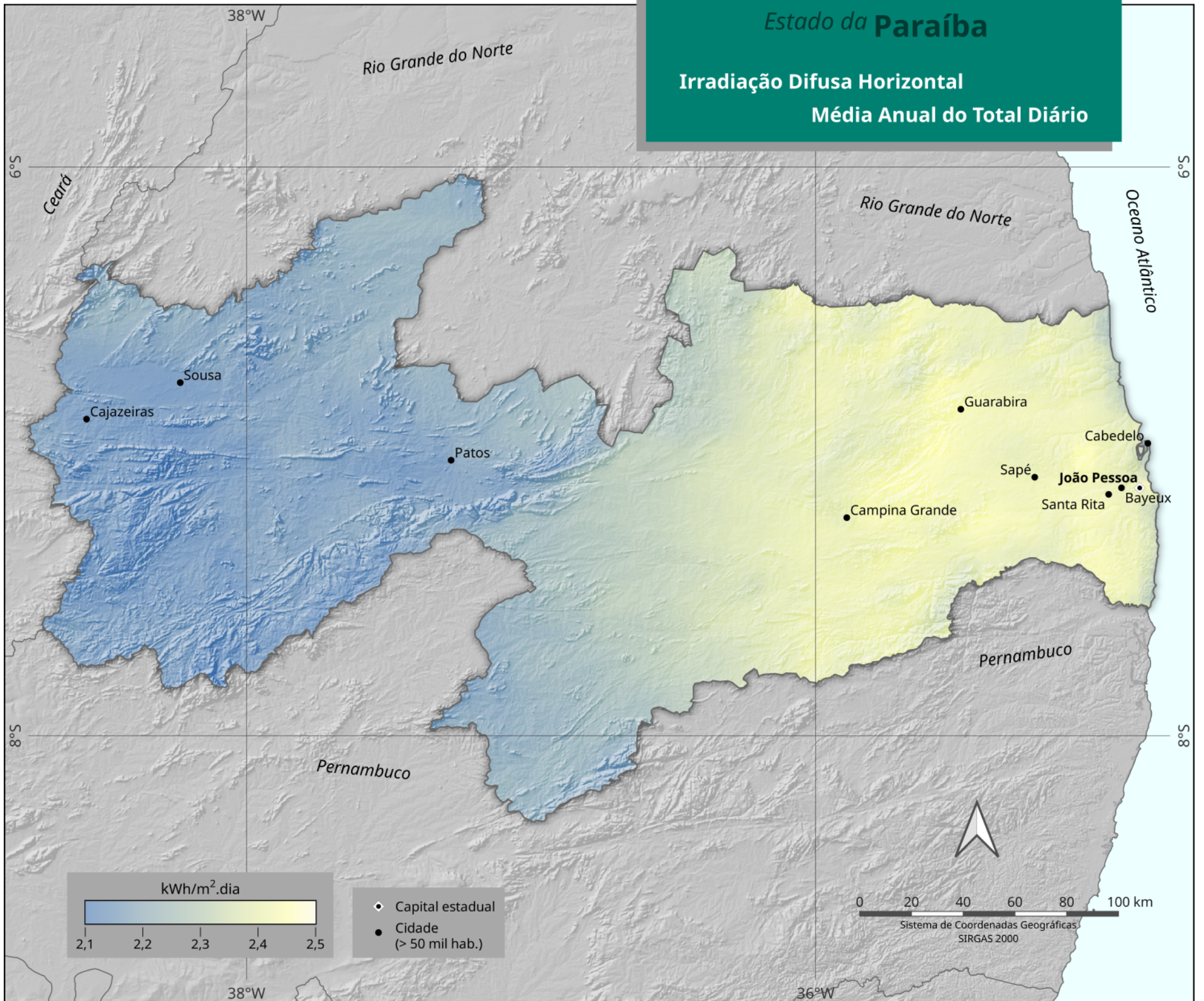
Estado da **Paraíba**

Irradiação Direta Normal

Média Mensal do Total Diário

Estado da Paraíba

Irradiação Difusa Horizontal Média Anual do Total Diário



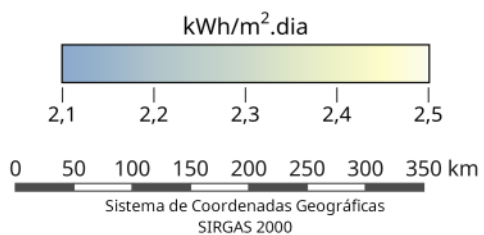
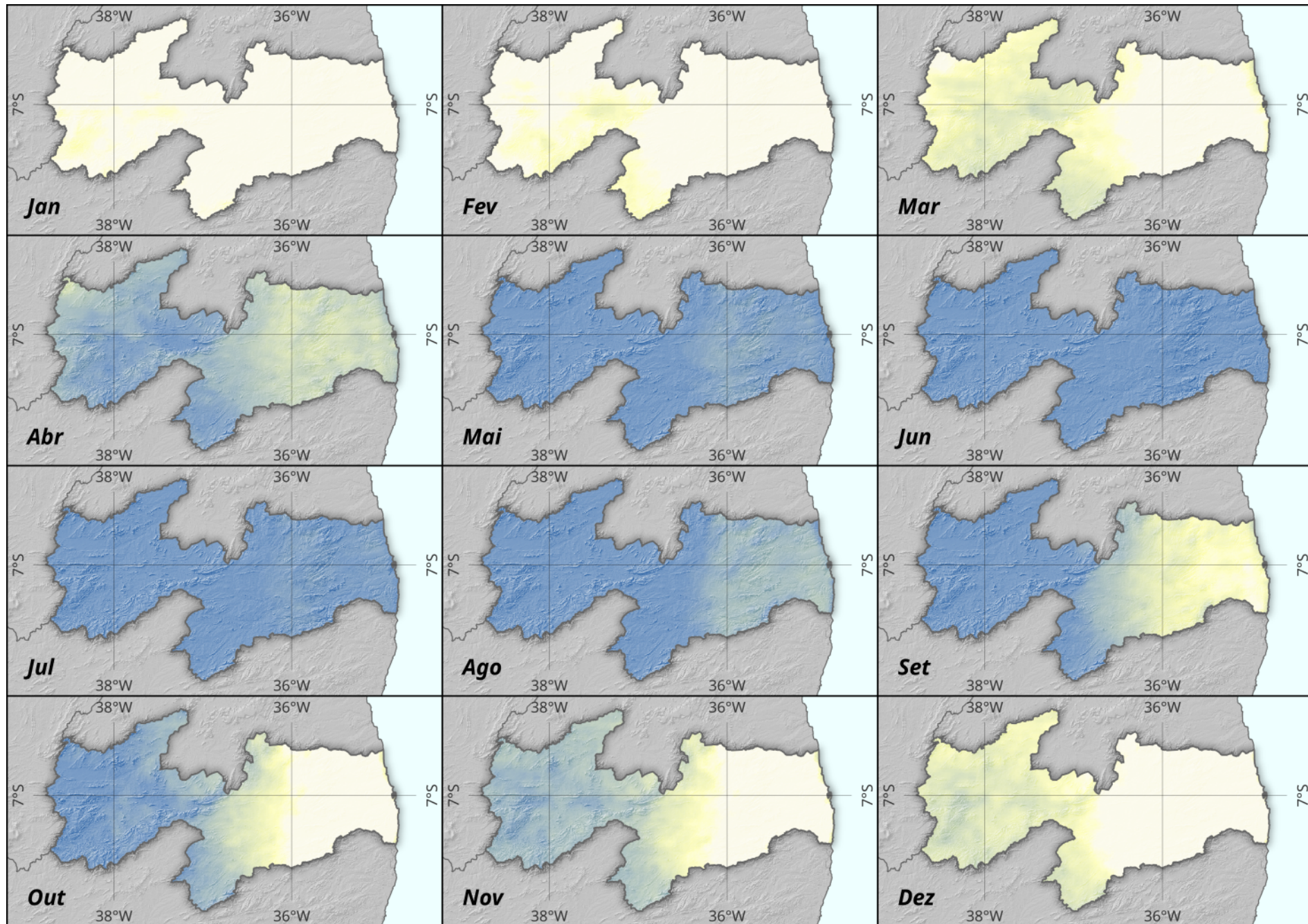
kWh/m².dia

2,1 2,2 2,3 2,4 2,5

- ◊ Capital estadual
- Cidade (> 50 mil hab.)

0 20 40 60 80 100 km

Sistema de Coordenadas Geográficas
SIRGAS 2000



Estado da **Paraíba**
Irradiação Difusa Horizontal
Média Mensal do Total Diário



POTENCIAL DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Neste tópico é apresentada uma análise dos potenciais de aplicação de sistemas de aproveitamento da energia solar fotovoltaica no estado da Paraíba.

Potencial teórico

Entende-se por potencial teórico o potencial disponível para geração solar fotovoltaica assumindo que os módulos seriam instalados em condições ideais para geração fotovoltaica, i.e., módulos orientados para o norte geográfico com inclinação de 10° em relação ao plano horizontal e sem sombreamento.

O cálculo do potencial teórico utilizou a base de dados de Irradiação Global no Plano Inclinado a 10° (GTI_{10}), assumindo o aproveitamento de todos os espaços possíveis do território da Paraíba para geração solar – taxa de ocupação em 100%. Para esta análise, nenhum tipo de restrição espacial foi adotada, de modo que áreas protegidas e alagadas também foram incluídas no cálculo.

Perdas óticas e elétricas na geração e transmissão de energia não foram consideradas, pois se projeta para o futuro o desenvolvimento e aprimoramento tecnológico. Esta premissa equivale a assumir uma Taxa de Desempenho do sistema fotovoltaico igual a 100%.

Além das premissas descritas acima, o cálculo assumiu:

- a área do Estado da Paraíba igual a 56.467,242 km² (IBGE, 2022);
- o valor médio da Irradiação Global Inclinação a 10° (GTI_{10}) no território paraibano determinado em 5,73 kWh/m².dia;
- a utilização de módulos fotovoltaicos com a tecnologia mais difundida no mercado atualmente – silício monocristalino, bifacial com potência de 650Wp, com área aproximada de 3,1 m² e eficiência de 21%.

Uma vez adotadas essas premissas, o potencial teórico obtido é de, aproximadamente, **12 TWp**, capaz de gerar em torno de **70 TWh/dia** ou **25.550 TWh/ano**. A título de ilustração, uma área com apenas 0,02% do Estado da Paraíba seria suficiente para gerar quantidade de eletricidade equivalente

ao consumo de energia de todo o estado no ano de 2021, que foi de 5.881GWh.

Potencial técnico

Assim como na determinação do potencial teórico, a avaliação do potencial técnico de geração fotovoltaica assume as condições ideais para geração, ou seja, módulos orientados para o norte geográfico com inclinação a 10° em relação ao plano horizontal e sem sombreamento. Além disso, as seguintes premissas foram estabelecidas:

- potencial teórico calculado anteriormente;
- exclusão de áreas com restrições ambientais e geográficas: adutoras, áreas de preservação permanente (margem de 50 metros para cursos d'água), massa d'água (margem de 100 metros), canais de transposição (margem de 50 metros), áreas urbanas (margem de 500 metros), declividades maiores que 5 graus, rodovias (margem de 100 metros), ferrovias (margem de 100 metros), terras indígenas, terras quilombolas, unidades de conservação;

- perdas óticas e elétricas no sistema fotovoltaico foram consideradas utilizando uma Taxa de Desempenho (*performance ratio*) igual a 75%;
- taxa de ocupação com módulos fotovoltaicos igual a 44 MWp/km², valor típico observado em usinas fotovoltaicas centralizadas operando no território brasileiro.

Considerando-se estas premissas, o potencial técnico foi determinado em aproximadamente **1,54 TWp**, capaz de gerar em torno de **6,88 TWh/dia** ou **2.512 TWh/ano**.

Potencial econômico - I

O primeiro cenário econômico para o potencial de geração fotovoltaica assume como ponto de partida o potencial técnico determinado no tópico anterior, adicionando uma restrição para a distância entre o local de interesse para geração e o ponto próximo para conexão ao Sistema Interligado Nacional (SIN):

- distância máxima igual ou inferior a 30km do ponto de conexão com a rede (linhas superiores a 69 kV).

Dessa forma, o resultado obtido para o potencial econômico I é de aproximadamente **1,46 TWp**, capaz de gerar em torno de **6,51 TWh/dia** ou **2.375 TWh/ano**.

Potencial econômico - II

O segundo cenário de potencial econômico tem como premissa, além daquelas consideradas nos cenários anteriores, a seguinte restrição:

- distância máxima do ponto de conexão com a rede (linhas superiores a 69 kV) igual ou inferior a 10km.

Assim, o potencial econômico II resulta em aproximadamente **907 GWp**, capaz de gerar em torno de **4,05 TWh/dia** ou **1.479 TWh/ano**. Para entender sua representatividade, esse potencial econômico indica que apenas 0,14% da área do estado seria suficiente para gerar uma quantidade de eletricidade igual ao consumo registrado no ano de 2021 para toda a Paraíba, cerca de 5.881 GWh.

Potencial econômico - III

O terceiro cenário adotado para o potencial econômico do recurso solar no estado da Paraíba tem como objetivo avaliar o aproveitamento da energia solar em sistemas de geração distribuída instalados em telhados das edificações em áreas urbanas. Para tal, as seguintes premissas foram adotadas:

- orientações indicadas na Nota Técnica DEA/EPE 19/14 - Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil - Condicionantes e Impactos;

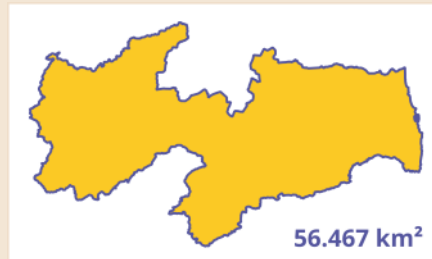
- informações sobre a quantidade e tipo de residências (casa ou apartamento) foram obtidas do CENSO 2010 do IBGE para áreas urbanas (fonte: <https://sidra.ibge.gov.br/>); quando da impressão deste documento, dados detalhados do Censo 2022 ainda não estavam disponíveis;
- assumiu-se a área média 85 m² de telhado para as casas e 15 m² por apartamento;
- adotou-se o total de domicílios em área urbana no Estado da Paraíba de 829.761 a partir de dados do IBGE (2022);
- fator de aproveitamento de 30% da área final encontrada para sistemas fotovoltaicos conectados à rede;
- base de dados de Irradiação Global no Plano Inclinado a 10° (GTI₁₀);
- sistema de geração com base em módulos fotovoltaicos Mono-PERC com potência aproximada de 650Wp, área aproximada de 3,1 m² e eficiência de 21%.

Considerando-se as premissas indicadas, estima-se o potencial econômico III em aproximadamente **4,16 GWp**, capaz de gerar em torno de **17,87 GWh/dia** ou **6,52 TWh/ano**, ou seja, energia superior à demanda de eletricidade do estado, sendo possível exportar o excedente para o Sistema Interligado Nacional (SIN).

A **Figura 5.1** apresenta o conceito de geração distribuída.

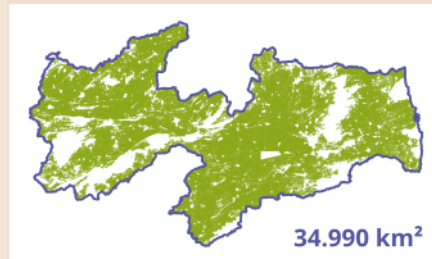
Potencial de geração fotovoltaica

**POTENCIAL
TEÓRICO**
25.550 TWh/ano



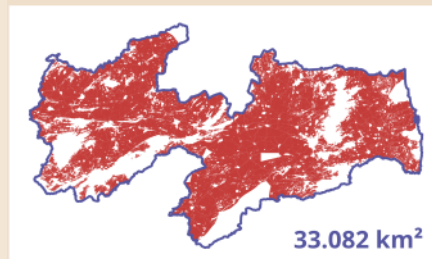
Dados de Irradiação no Plano Inclinado a 10°;
Módulos fotovoltaicos em condições ideais;
Taxa de desempenho = 100%;
Considerada a área total do Estado da Paraíba
(taxa de ocupação = 100%).

**POTENCIAL
TÉCNICO**
2.512 TWh/ano



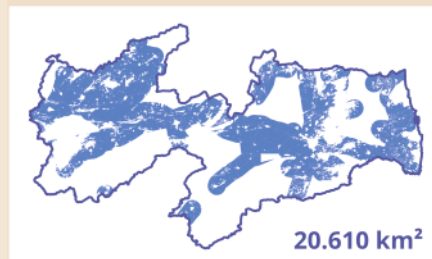
Utilizado o potencial teórico, excluídas:
Áreas com declividade acima de 5 graus;
Adutoras, áreas de preservação permanente, massas d'água,
canais de transposição, áreas urbanas, rodovias, ferrovias,
terras indígenas, terras quilombolas e unidades de
conservação.

**POTENCIAL
ECONÔMICO I**
2.375 TWh/ano



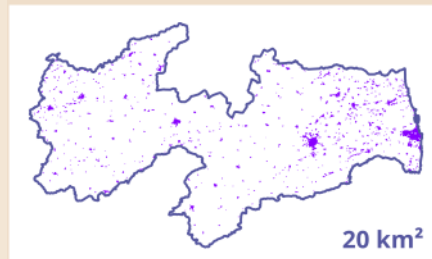
Utilizado o potencial técnico, excluídas também as áreas a
mais de 30 km das linhas de transmissão e distribuição.

**POTENCIAL
ECONÔMICO II**
1.479 TWh/ano



Utilizado o potencial econômico I, excluídas também as áreas
a mais de 10 km das linhas de transmissão e distribuição.

**POTENCIAL
ECONÔMICO III**
6,52 TWh/ano



Sistemas de geração distribuída instalados nos telhados das
edificações em áreas urbanas;
Adoção da Nota Técnica DEA/EPE 19/14;
Áreas médias de telhado de 85 m² para casas e 15 m² para
apartamentos.

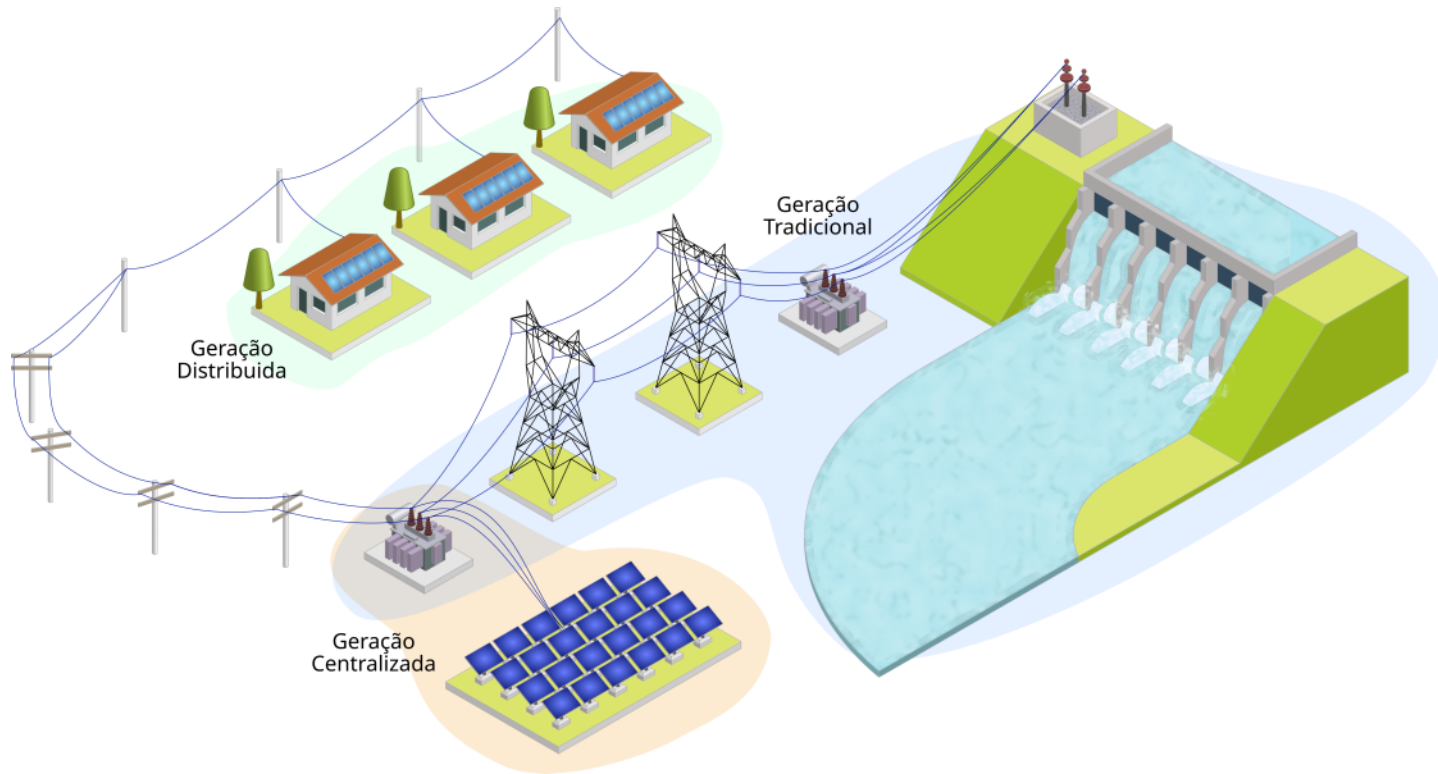


Figura 5.1 - Instalações fotovoltaicas em residências, em indústrias ou edificações e em áreas rurais.



OUTROS ASPECTOS RELEVANTES

Energia solar térmica (ou termossolar)

O aproveitamento térmico da energia solar é feito desde a antiguidade por nossa sociedade, sendo uma forma simples e eficiente de conversão de energia para diversas aplicações, desde aquecimento de água, insumo para processos industriais, desidratação e cocção de alimentos até para geração de eletricidade.

Aquecimento de água

Os edifícios comerciais, públicos e residenciais são responsáveis por grande parte do consumo de energia elétrica no Brasil e, nas residências brasileiras, o chuveiro elétrico é o equipamento com maior participação nesse consumo. Uma alternativa para reduzir o consumo de eletricidade, principalmente no setor residencial, é o emprego de aquecedores solares da água. A [Figura 6.1](#) ilustra o funcionamento de um aquecedor solar residencial.

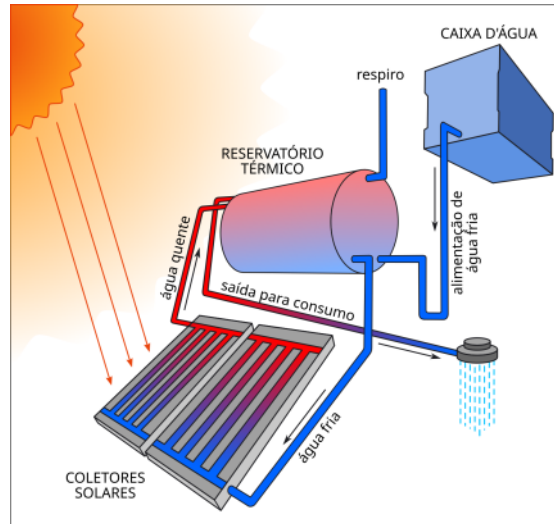


Figura 6.1 - Esquema de um sistema de baixo custo para aquecimento doméstico da água empregando calor solar.

O Estado da Paraíba, embora não apresente altas amplitudes térmicas ao longo do ano se comparado aos estados do sul e sudeste, ainda pode se beneficiar com o aproveitamento da energia termossolar em processos industriais que demandam água aquecida. A indústria têxtil e as agroindústrias, como laticínios e galpões de beneficiamento de frutas, são alguns exemplos de setores que poderiam abater o

consumo elétrico (ou de lenha) a partir do aquecimento termossolar para seus processos industriais.

Geração de eletricidade

A energia solar térmica também pode ser utilizada para a geração de eletricidade. Plantas heliotérmicas ou CSP (*Concentrated Solar Power*) estão sendo desenvolvidas em caráter experimental e até comercial no intuito de agregar estabilidade à geração de eletricidade solar. Os concentradores consistem em campos de espelhos, na configuração torre central, ou calhas parabólicas/espelhos Fresnel na concentração linear (a [Figura 2.10](#), citada anteriormente, ilustra esses sistemas). Em ambos, o calor é utilizado para vaporizar um fluido e mover turbinas convencionais acopladas a geradores. Plantas com torres centrais ainda encontram obstáculos para sua implantação no Brasil pela alta variabilidade da irradiação solar nos locais de maior insolação, devido às características da atmosfera tropical, além dos custos elevados de implantação e operação, que tornam estes projetos ainda

pouco competitivos. Por outro lado, soluções híbridas que combinam um concentrador solar linear a outra fonte de calor complementar (como biomassa) vem ganhando atenção e podem se tornar alternativas importantes para compor o parque gerador brasileiro no futuro.

Complementaridades (geração híbrida)

Embora a radiação solar não constitua uma fonte de energia despachável visto que é dependente das flutuações do ambiente meteorológico, usinas híbridas solar-eólicas têm surgido como uma alternativa para redução dessa variabilidade no parque gerador, além de reduzir custos pelo compartilhamento de infraestrutura. Nesse contexto, os estados do nordeste brasileiro se destacam pela abundância dessas duas fontes de energia. Ademais, considerando-se que o SIN é alimentado principalmente por usinas hidrelétricas, apresentando consequentemente forte dependência do regime hídrico, pode se beneficiar com a penetração da fonte solar. Por norma, períodos de seca se caracterizam por menor nebulosidade, portanto, maiores níveis de irradiação solar. Períodos de ventos (alísios) mais intensos também se caracterizam por menor precipitação na região nordeste, como diversos estudos já mostraram. Sendo assim, a complementaridade entre as fontes hídrica-solar-eólica (Figura 6.2) se apresenta como uma importante opor-

tunidade para maximizar o emprego das energias renováveis com segurança e baixo impacto ambiental.

Hidrogênio verde

O hidrogênio produzido a partir de fontes renováveis de energia, conhecido com hidrogênio verde, desponta como um novo vetor energético para a descarbonização das matrizes de energia no mundo todo. Além dos mercados já tradicionais de fertilizantes, refino e outros usos (como gases industriais e hospitalares, dentre outros), novos mercados para o hidrogênio verde podem ser desenvolvidos nos segmentos de transporte, geração

elétrica, armazenamento de energia e processos industriais. Metas de neutralidade climática e de segurança energética, tem levado economias sólidas de países na Europa e Ásia a lançar investimentos importantes de fomento a uma transição energética baseada no hidrogênio verde. Contudo, muitos desses países não dispõem de farto potencial de energia renovável como o Brasil, desfavorecendo sua produção local e abre um mercado promissor para exportação dessa *commodity* pelo Brasil. Particularmente os estados do nordeste brasileiro possuem altos níveis de irradiação solar ao longo do ano, com baixíssima variabilidade inter-anual e decenal e tais condições poderiam ser ideais para o desenvolvimento de plantas geradoras de hidrogênio verde. Contudo, a produção do hidrogênio verde através da eletrólise de água, requer mais de 18 litros de água doce para produzir um quilograma de hidrogênio, considerando-se o estágio atual da tecnologia. Isso representa um desafio em um estado onde os recursos hídricos são escassos, exatamente onde ocorrem os maiores níveis de irradiação solar. A Figura 6.3 apresenta o esquema de produção do hidrogênio verde.

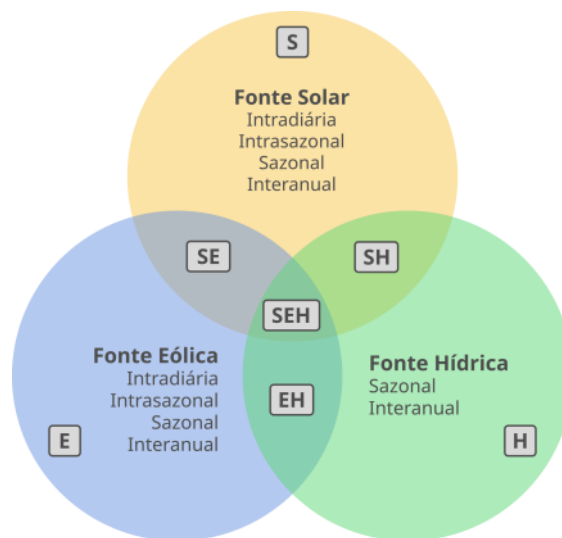


Figura 6.2 - Diagrama sistematizando de possíveis complementariedades entre as fontes renováveis assim como respectivas escalas de variabilidade.

Fonte: André Gonçalves, 2017.

Energia solar e mitigação de emissões

A geração de energia solar desempenha um papel importante no paradigma de crescimento econômico moderno, susten-

tável e com baixo impacto ambiental. Como fonte livre de emissões durante a geração de eletricidade, a energia solar pode reduzir as emissões de CO₂ do setor de geração elétrica, uma vez que cada MWh de energia gerada empregando a fonte solar evita entre 534 e 1143 kg de CO₂ equivalentes emitidos para a atmosfera em plantas termoeletricas alimentadas com combustíveis fósseis.

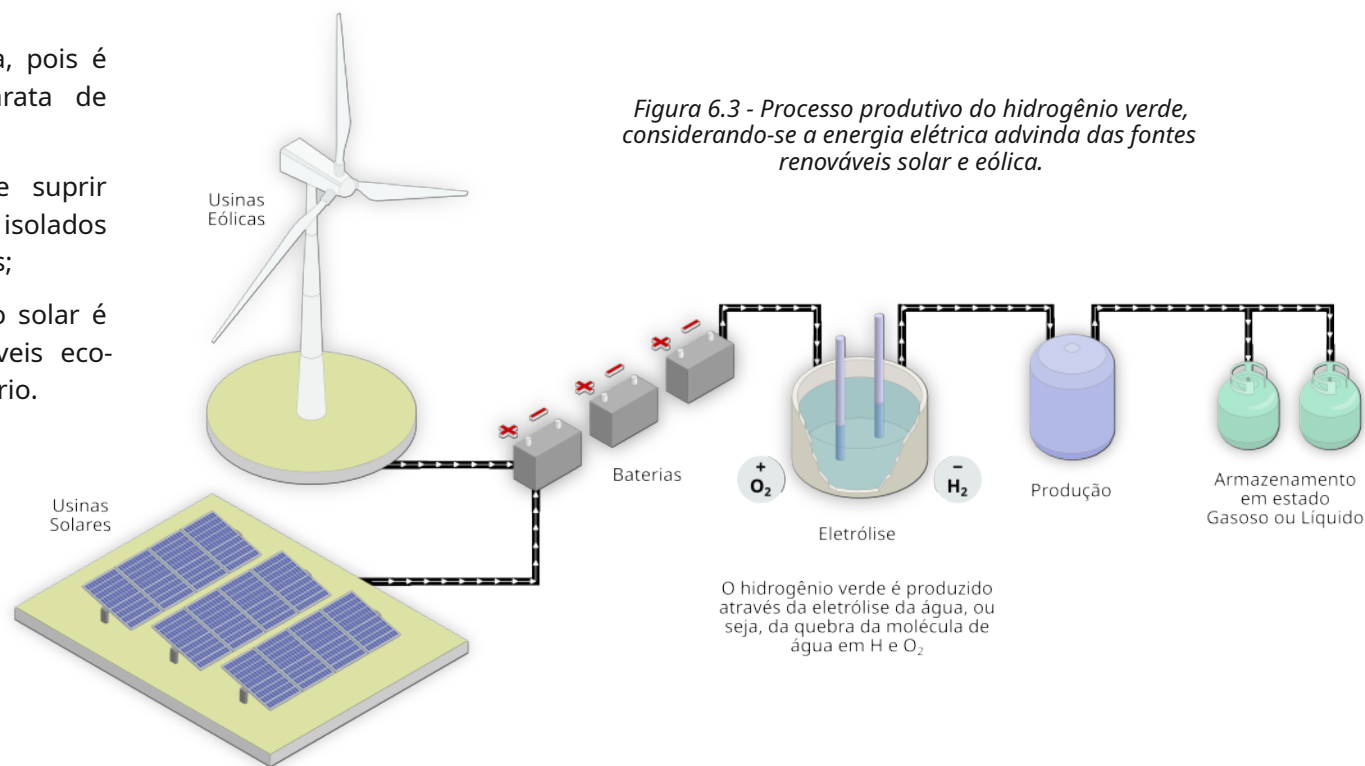
A diversificação e eletrificação da matriz energética brasileira representa uma oportunidade ambiental e econômica se realizada em bases predominantemente renováveis. Neste contexto, a energia solar se destaca entre as tecnologias de baixo carbono em pelo menos três aspectos determinantes:

- pela competitividade econômica, pois é atualmente a forma mais barata de geração de eletricidade;
- pela escalabilidade, pois pode suprir desde pequenos consumidores isolados até grandes plantas centralizadas;
- pela abundância, pois o recurso solar é amplamente distribuído em níveis economicamente viáveis pelo território.

A evolução rápida de sistemas de armazenamento, como baterias, armazenamento térmico, ou, futuramente, o hidrogênio verde, soma-se aos ganhos promovidos pela energia solar, pois permitirá impulsionar a descarbonização de setores mais difíceis, tais como o transporte e as indústrias do cimento e siderúrgica. Nessa esteira, a energia solar se apresenta como a principal alternativa para um posicionamento estratégico do país no mercado de hidrogênio verde, podendo tornar o Brasil um dos países mais competitivos do mundo neste produto no longo prazo.

Tecnologia, economia e geração de empregos

Segundo dados da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), o emprego de tecnologias de aproveitamento da energia solar já gerou mais de 390 mil postos de trabalho entre 2012 e 2020, sendo a maior parcela destes oriunda do segmento de geração distribuída, devido à forte expansão desse setor. A geração de empregos diretos ocorre principalmente nas atividades de instalação de sistemas fotovoltaicos, beneficiando principalmente o perfil de ensino médio profissionalizante, conforme ilustra a [Figura 6.4](#). Os empregos



indiretos estão associados a cadeia do aço, alumínio, cobre e do concreto, pelos materiais utilizados nas instalações.

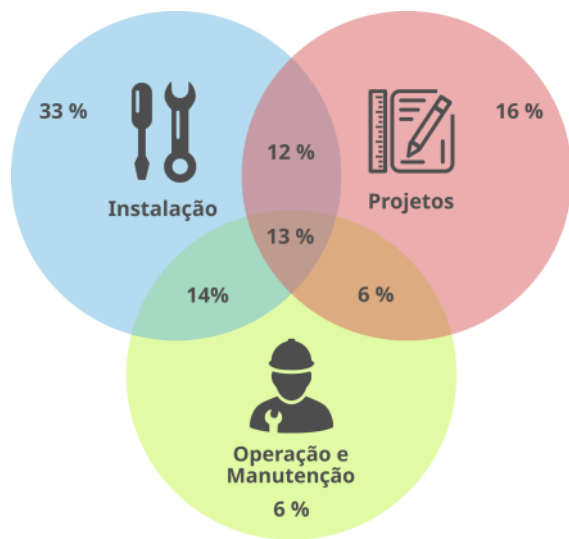


Figura 6.4 - Perfil de atuação dos empregos diretos gerados pelo setor de energia solar.

Fonte: ABSOLAR.

Variabilidade climática do potencial solar

Para o estudo da variabilidade climática foram selecionadas quatro importantes cidades representativas do Estado da Paraíba, apresentadas na Figura 6.5.

O recurso solar apresenta como característica uma elevada variabilidade diária devido ao ciclo diurno e uma moderada variabilidade intrasazonal. No Estado da Paraíba, onde a média anual de

irradiação global é de 5,71 kWh/m², os totais diários podem variar de 2,0 kWh/m² a 8,0 kWh/m², dependendo dos sistemas meteorológicos atuantes. Por outro lado, o recurso solar apresenta uma baixa variabilidade ao longo dos anos para o Estado da Paraíba, de modo que a variação entre um ano de maior potencial e outro de menor potencial solar é, tipicamente, inferior a 5,0% em torno de seu valor médio climatológico, como mostra a Figura 6.6. Esta variabilidade é inferior do que a variabilidade sazonal, mostrada pelos extremos dos gráficos de caixa ('box plots'). Estes dados demonstram a grande estabilidade interanual da geração solar quando comparado a outras fontes renováveis disponíveis na região, como a eólica e hídrica. Quanto às tendências, cenários climáticos futuros apontam uma discreta redução (de 1% a 2%) no potencial solar nas mesorregiões do Sertão Paraibano, Borborema e Agreste Paraibano até o meio do século, embora exista ainda grande incerteza sobre estes impactos.

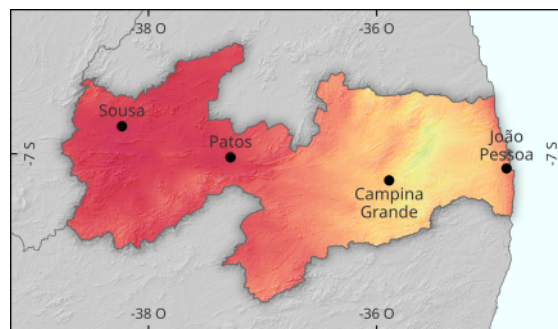


Figura 6.5 - Localidades representativas para as quais foram gerados gráficos de variabilidade: João Pessoa, Campina Grande, Patos e Sousa.

Observando a variação da irradiação solar nas quatro localidades, percebe-se que o recurso de energia solar apresentou uma variação positiva nos anos de 2015 e 2016 em todas as localidades. Por outro lado, o recurso solar apresentou valores abaixo da média nos quatro locais em 2018, com redução de até 3,5% em relação à média do período de 10 anos.

A Figura 6.7 mostra a variabilidade diária para cada componente da irradiação solar na Paraíba estimada pelo desvio-padrão (σ) dos totais diários de irradiação ao longo dos anos. Em princípio, o desvio-padrão pode ser útil para estimar o quão diferentes os dias são em torno da média (μ), de modo que $\mu \pm \sigma$ contém 68,2% dos dias, $\mu \pm 2\sigma$ contém 95,6% dos dias e assim por diante, assumindo distribuições aproximadamente gaussianas.

Nota-se pelos mapas que a maior variabilidade da GHI (superior a 600Wh/m²) ocorre na porção sudoeste da região intermediária de Campina Grande (próximo ao município de Monteiro), além de pequenas porções das regiões intermediárias de João Pessoa (próximo ao litoral) e de Patos. A DNI, por outro lado, apresenta maior variabilidade a noroeste da região intermediária de Souza-Cajazeiras, chegando a valores superiores a 800Wh/m². A irradiação global no plano inclinado (GTI) apresenta uma variabilidade 20% inferior à GHI, atingindo valores máximos de na faixa de 500Wh/m². A DHI apresenta baixa variabilidade em todo estado, com valores absolutos na faixa de 150 – 300wh/m².

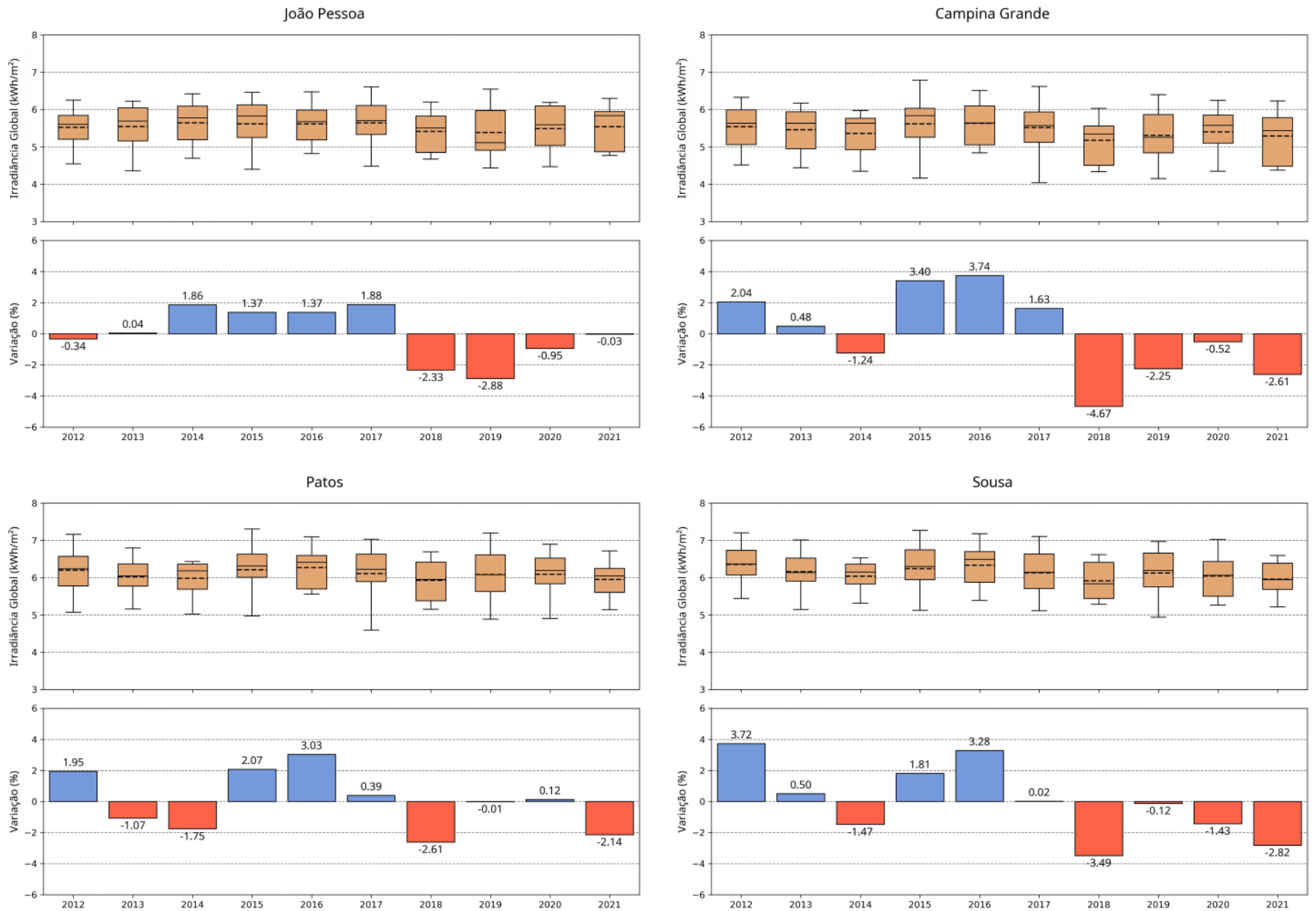


Figura 6.6 - Gráficos da variabilidade climática do recurso solar em quatro localidades representativas: João Pessoa, Campina Grande, Patos e Sousa. O gráfico de caixas (superior) mostra a variabilidade sazonal através da distribuição das médias mensais ao longo do ano. A média anual se encontra em linha tracejada. O gráfico de variação (inferior) mostra a variação das médias anuais em torno da média de longo prazo (climatológica).

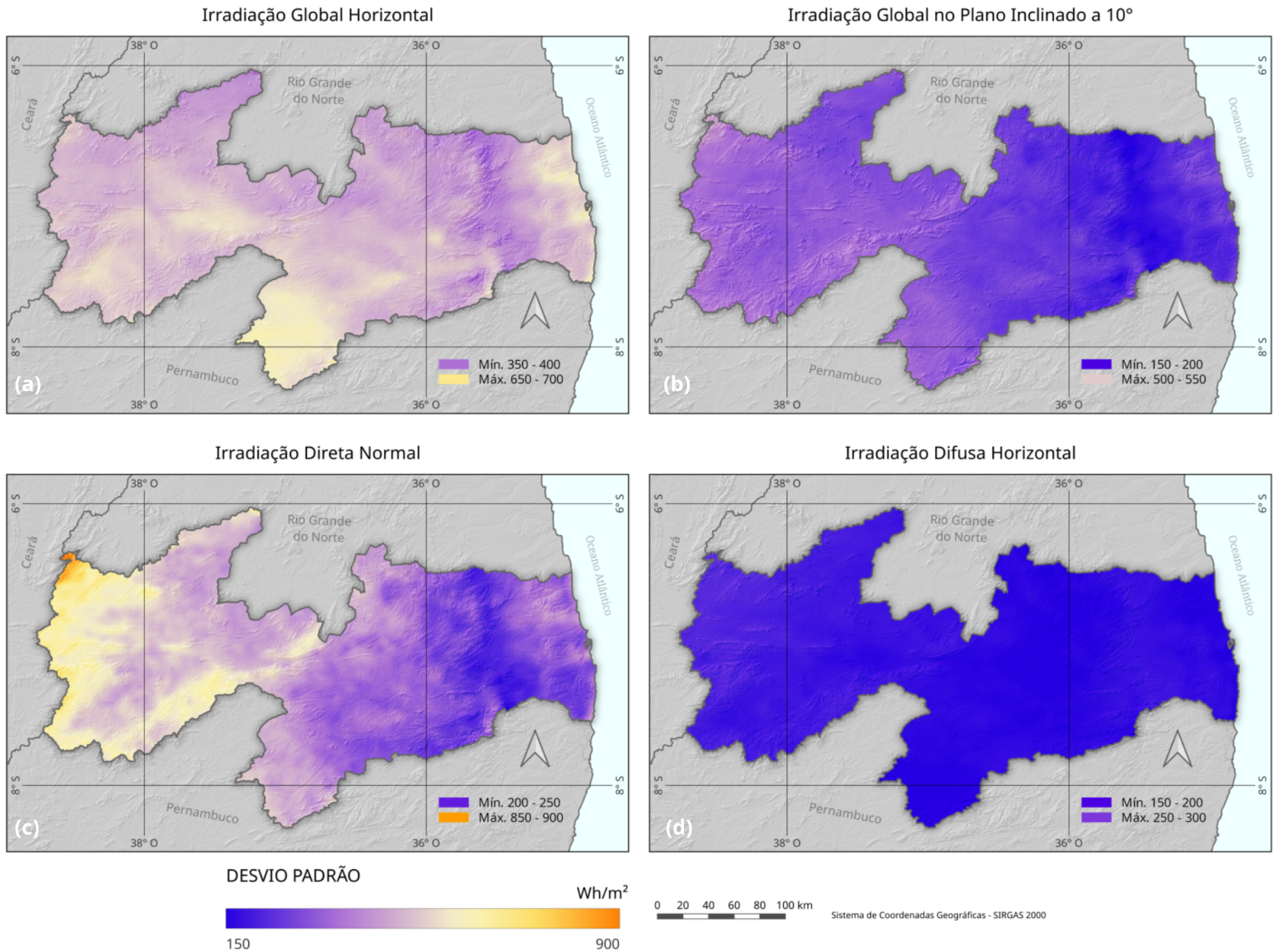


Figura 6.7 - Desvio-padrão (σ) dos totais diários de irradiação (a) global horizontal; (b) global inclinada; (c) direta normal e (d) difusa horizontal obtidos ao longo dos anos de 2012 a 2021.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crise do petróleo da década de 70, com a alta dos preços imposta pelos países da OPEP, mostrou a fragilidade dos países pela sua grande dependência desse recurso, o que determinou desde então com que se buscasse fontes alternativas ao petróleo que pudessem atender às demandas.

Em décadas ainda mais recentes, o mundo se deparou com um novo paradigma, ainda mais desafiador: a necessidade de encontrar fontes alternativas e renováveis de energia, não apenas devido ao preço e dependência dos combustíveis fósseis, mas agora em decorrência da sua queima e emissão de CO₂ na atmosfera, o que contribui de forma significativa com o aumento da temperatura global e com as mudanças climáticas no planeta.

Dentro desse contexto, a fonte solar, e principalmente a solar fotovoltaica, se mostrou extremamente confiável e uma grande aliada no combate às mudanças climáticas, com capacidade instalada mundial passando, em pouco mais de vinte anos, de 1 GWp em 1999 para mais de 1 TWp.

A situação no Brasil não tem sido diferente. Ao longo dos últimos 30 anos, importantes pesquisas e publicações foram desenvolvidas que embasaram e continuam a contribuir para a aplicação desta fonte em solo brasileiro, com destaque àquelas desenvolvidas pelo INPE, como a publicação do Atlas Brasileiro de Energia Solar, 1ª e 2ª edições, as quais já indicavam o excelente potencial solar em todo o Brasil, em especial na região nordeste.

O Estado da Paraíba, perceptivo a estas mudanças, deu mais um passo importante em sua rica história, entregando à sociedade paraibana o Atlas Solarimétrico da Paraíba e sua Ferramenta Interativa Web, para promover e disseminar o uso desta tecnologia e, desta forma, contribuir para uma matriz energética mais limpa e renovável. A Ferramenta Interativa permite a realização de consultas e simulações para qualquer local do estado. O acesso a essas informações permitirá maior assertividade nos investimentos a serem realizados no estado, beneficiando governo e sociedade com a geração de empregos e renda.





ANEXO - LEGISLAÇÃO APLICADA AO SETOR DE ENERGIA

A legislação brasileira aplicada ao setor de energia vem evoluindo continuamente para atender às questões que se apresentam em razão do avanço científico e tecnológico e aspectos ambientais associados às mudanças climáticas, preservação, conservação e recuperação do meio ambiente, visando propiciar tanto o acesso à energia e seus benefícios quanto a saúde e qualidade de vida da população brasileira.

Com relação ao atendimento da legislação ambiental, a Resolução CONAMA 237/1997 permite que os órgãos ambientais estabeleçam procedimentos simplificados para o licenciamento ambiental de empreendimentos de pequeno potencial de impacto ambiental, e a Resolução CONAMA 279/2001 (e suas alterações) estabelece procedimento simplificado para o licenciamento ambiental dos empreendimentos com impacto ambiental de pequeno porte, que inclui a geração com aproveitamento do recurso solar.

As Tabelas A.1, A.2, A.3 e A.4 apresentam uma breve lista de documentos que possuem carácter de regulamentação, normatização e orientação para instalações voltadas ao aproveitamento do recurso energético solar. É importante ressaltar que este capítulo não tem intuito de esgotar a discussão sobre a temática, uma vez que a geração solar é um setor que está em evolução contínua e com crescimento rápido na participação na matriz energética brasileira.

A nota técnica “Legislação Ambiental de interesse do setor elétrico”, publicada pela Eletrobrás em setembro de 2022, é uma fonte importante de informação que apresenta uma abordagem bastante completa do ordenamento jurídico brasileiro aplicado ao setor de energia. Outra fonte importante de consulta é a Nota Técnica “Levantamento da legislação para licenciamento ambiental de empreendimentos de geração de energia elétrica por fonte solar” elaborada conjuntamente pela Eletrobrás e pela EPE e publicada em maio de 2022

(DGOA 017/2022 NT-EPE-DEA-SMA-019/2022). Ambos os documentos estão listados nas referências bibliográficas deste Atlas.

A Tabela A.1 inclui as normas ABNT e a Tabela A.2 as resoluções ANEEL relacionadas à geração de energia elétrica a partir da fonte solar. Artigos técnicos e científicos abordando os aspectos da legislação técnica e ambiental (Tabela A.3), tanto em âmbito nacional quanto regional, estão disponíveis para acesso público e novos estudos devem seguir em futuro breve, dado o crescimento do setor e o interesse que o tema possui para os empreendedores, tomadores de decisão e para a sociedade civil como um todo (Hoffmann et al., 2019; Luna et al., 2019; Silva et al., 2019; Pereira, 2019; Viana e Basso, 2021; Severo et al., 2022). E por último, a Tabela A.4 lista a legislação federal e estadual aplicadas ao setor.

Tabela A.1 - Normas direcionadas a usinas de geração de eletricidade a partir da fonte solar.

Documento	Data	Breve descrição
ABNT NBR 10.899/2020	18/08/2020	Normatiza a terminologia e especifica os termos técnicos relativos aos sistemas de conversão fotovoltaica de energia radiante solar em energia elétrica.
ABNT NBR 16.690/2019	03/10/2019	Estabelece os requisitos de projeto das instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos, incluindo disposições sobre os condutores, dispositivos de proteção elétrica, dispositivos de manobra, aterramento e equipotencialização do arranjo fotovoltaico.
ABNT NBR 16.274/2014	06/04/2014 (em revisão)	Estabelece as informações e a documentação mínimas que devem ser compiladas após a instalação de um sistema fotovoltaico conectado à rede. Também descreve a documentação, os ensaios de comissionamento e os critérios de inspeção necessários para avaliar a segurança da instalação e a correta operação do sistema.

Tabela A.2 - Portarias e resoluções normativas voltadas à geração de eletricidade por fonte solar.

Documento	Data	Breve descrição
Resolução Normativa ANEEL nº 1059/2023	07/02/2023	Aprimora as regras para a conexão e o faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica, bem como as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica; altera as Resoluções Normativas nº 920, de 23 de fevereiro de 2021, 956, de 7 de dezembro de 2021, 1.000, de 7 de dezembro de 2021, 1009, de 22 de março de 2022, e dá outras providências.
Lei nº 14.300/2022	06/01/2022	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
Portaria MME nº 538/2015	15/12/2015	Cria o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica - ProGD, com os seguintes objetivos: I - promover a ampliação da geração distribuída de energia elétrica, com base em fontes renováveis e cogeração; II - incentivar a implantação de geração distribuída em: a) edificações públicas, tais como escolas, universidades e hospitais; e b) edificações comerciais, industriais e residenciais.
Resolução Normativa ANEEL nº 687/2015	24/11/2015	Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição - PRODIST.
Resolução Normativa ANEEL nº 482/2015	17/04/2012	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.

Tabela A.3 - Artigos técnicos e científicos abordando a legislação técnica e ambiental em várias alçadas.

Documento	Data	Breve descrição
Nota Técnica Conjunta Eletrobrás /EPE DGOA 017/2022 NT-EPE-DEA-SMA-019/2022	12/2022	Levantamento da legislação de licenciamento ambiental de empreendimentos de geração de energia elétrica por fonte solar: situação em 2022.
Nota Técnica Solar Fotovoltaica Flutuante EPE-DEE-NT-016/2020-r0	19/02/2020	Apresentar a tecnologia dos sistemas solares flutuantes, bem como discutir suas potenciais vantagens e desafios considerando as particularidades do Brasil. Aspectos socioambientais, jurídicos e de competitividade também são abordados.
Nota Técnica Expansão da Geração Usinas associadas eólico-fotovoltaicas Considerações para cálculo de garantia física de energia EPE-DEE-NT-084/2020-r0	16/12/2020	Documento apresenta proposta de metodologia para a estimativa do curtailment na Garantia Física de energia, visando subsidiar a definição pelo MME, a ser considerada nesses arranjos inovadores.
Estudo de Refinamento do Mapeamento da Área Potencial de Telhados de Edificações Residenciais no Brasil	2020	Propõe metodologia de mapeamento da área potencial de telhados de edificações residenciais no Brasil para fins de aproveitamento energético fotovoltaico.
Nota Técnica Projetos Fotovoltaicos nos Leilões de Energia Características dos empreendimentos participantes nos leilões de 2013 a 2018 EPE-DEE-NT-091/2018-r0	17/10/2018	A nota tem como objetivo de disseminar informações referentes aos projetos dessa fonte, discutindo algumas tendências e os aspectos mais relevantes. O documento apresenta aspectos da habilitação técnica e dos projetos vendedores nos leilões A-4 de 2017 e 2018, além de análises da evolução dos projetos ao longo dos seis anos de participação nos Leilões de Energia do Mercado Regulado.
Nota Técnica DEA/EPE 19/14 Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos		Tem como objetivo entender a dinâmica da geração fotovoltaica distribuída no horizonte decenal, dadas diferentes condicionantes. Para isto, foram estabelecidos objetivos específicos para compor o estudo: <ul style="list-style-type: none"> - Identificar os principais avanços obtidos e possíveis barreiras; - Levantar o potencial técnico de geração fotovoltaica residencial; - Alavancar a geração distribuída da fonte solar fotovoltaica de pequeno porte; - Identificar e avaliar, qualitativa e quantitativamente, os impactos para os diversos agentes envolvidos.

Tabela A.4 - Leis, decretos, portarias e normas que regulamentam a atividade de geração de energia.

Documento	Data	Breve descrição
Lei Federal 14.300	06/01/2022	Institui o marco legal da micro geração e mini geração 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.
Decreto Federal 8.874/2016	13/10/2006	Regulamenta as condições para aprovação dos projetos de investimento considerados como prioritários na área de infraestrutura ou de produção econômica intensiva em pesquisa, desenvolvimento e inovação, para efeito do disposto no Art. 2º da Lei 12.431/2011, e revoga o Decreto 7.603/2011. São considerados prioritários os projetos que proporcionem benefícios ambientais ou sociais relevantes como os projetos baseados em tecnologias renováveis de geração de energia solar.
Portaria Ibama 78/2021	13/01/2021	Estabelece parâmetros de sensibilidade ambiental (Anexos IV.A a IV.O) e classificação de risco de atividades econômicas associadas aos atos de liberação sob responsabilidade do Ibama (licenciamento ambiental federal) relacionadas à: sistemas de transmissão de energia elétrica (Anexo IV.D); geração a partir de energia solar (Anexo IV.G); em terras indígenas (Anexo IX.L); supressão de vegetação e captura, coleta, manejo e transporte de fauna (Anexo IV.O).
Portaria MMA 326/2020	24/07/2020	Institui o Programa Agenda Ambiental na Administração Pública - Programa A3P e estabelece suas diretrizes. O Programa A3P tem a finalidade de promover a responsabilidade socioambiental, a adoção de procedimentos de sustentabilidade e critérios socioambientais nas atividades do setor público incluindo o uso da energia solar quando implique em economia de energia e produzam pouco ou nenhum impacto ambiental (Art. 2º, I, II, IV, V e VI).
Norma Administrativa Sudema 101/2017 (Estado da Paraíba)	11/04/2017	Dispensa do licenciamento ambiental no estado da Paraíba para atividades que se enquadrem como sendo de micro ou pequeno porte e com pequeno potencial poluidor, incluindo a micro geração solar fotovoltaica, conforme definido na Nota Técnica Conjunta Eletrobrás/EPE - NT Eletrobrás DGOA 003/2021 / NT-EPE-DEA-SMA-006-2021 Classificação: Público 30.



ÍNDICE DE FIGURAS, QUADROS E TABELAS

Figura 1.1	<i>Mapa da Divisão Urbano Regional</i>	4	Figura 1.11	<i>Percentual de participação por classe de consumo da fonte solar fotovoltaica</i>	20	Figura 2.7	<i>Exemplos de processos de medição da radiação solar direta</i>	28
Figura 1.2	<i>Topografia</i>	5	Figura 1.12	<i>Percentual de participação das fontes renováveis na matriz energética</i>	20	Figura 2.8	<i>Plataformas de coleta de dados solarimétricos</i>	29
Figura 1.3	<i>Mapa da declividade do terreno</i>	7	Figura 1.13	<i>Sistema elétrico</i>	22	Figura 2.9	<i>Ilustração do efeito fotovoltaico sobre uma célula fotovoltaica</i>	30
Figura 1.4	<i>Mapa da precipitação</i>	8	Figura 2.1	<i>Movimento da Terra em torno do Sol</i>	24	Figura 2.10	<i>Sistemas de geração heliotérmica</i>	31
Figura 1.5	<i>Mapa dos tipos climáticos</i>	11	Figura 2.2	<i>Principais ângulos que definem a posição do Sol na abóbada celeste</i>	25	Figura 3.1	<i>Diagrama da metodologia empregada no Atlas Solarimétrico</i>	33
Figura 1.6	<i>Mapa da temperatura diurna</i>	12	Figura 2.3	<i>Ângulo de declinação (δ)</i>	25	Figura 3.2	<i>Imagens no canal visível dos satélites GOES 13 e GOES 16</i>	35
Figura 1.7	<i>Mapa dos recursos hídricos</i>	13	Figura 2.4	<i>Espectro da radiação solar incidente</i>	26	Figura 3.3	<i>Mapas de relevo e de biomas utilizados no modelo BRASIL-SR</i>	36
Figura 1.8	<i>Unidades de Conservação, Terras Indígenas e Quilombolas</i>	17	Figura 2.5	<i>Componentes da radiação solar incidente</i>	26	Figura 3.4	<i>A área adotada na configuração do modelo BRASIL-SR e localização das estações de superfície</i>	37
Figura 1.9	<i>Mapa da densidade demográfica</i>	18	Figura 2.6	<i>Respostas espectrais relativas de uma célula solar Sc-Si e de um piranômetro termopilha</i>	28			
Figura 1.10	<i>Evolução do Produto Interno Bruto</i>	19						

Figura 3.5 <i>Fluxograma do processo de qualificação</i> 40	Qd. Incertezas 29	Tabela 3.3 <i>Métricas de validação das saídas do modelo para os totais diários de irradiação global horizontal</i> 41
Figura 3.6 <i>Diferenças de viés entre as bases solarimétricas do Brasil-2017 e da Paraíba-2023</i> 42	Qd. Potencial de Geração Fotovoltaica 54	Tabela 3.4 <i>Métricas de validação das saídas do modelo para a irradiação direta normal</i> 41
Figura 5.1 <i>Instalações fotovoltaicas em residências, em indústrias ou edificações e em áreas rurais</i> 55	Qd. Satélites geoestacionários <i>Abrangência da série GOES, Órbita</i> 34	Tabela 3.5 <i>Diferenças entre as bases de dados do Atlas Solarimétrico da Paraíba e o Atlas Brasileiro de Energia Solar</i> 42
Figura 6.1 <i>Sistema de baixo custo para aquecimento doméstico de água</i> 56	Qd. Usinas Fotovoltaicas <i>Coremas (a), (b), (c) e (d)</i> 23	Tabela A.1 <i>Normas para usinas de geração de eletricidade com fonte solar</i> 64
Figura 6.2 <i>Diagrama de complementariedades entre as fontes renováveis e escalas de variabilidade</i> 57	Qd. Vegetação <i>Caatinga, Cacto quipá no Cariri, Litoral paraibano, Manguezais, Mata Atlântica, Planalto da Borborema</i> 9	Tabela A.2 <i>Portarias e resoluções normativas voltadas à geração de eletricidade por fonte solar</i> 64
Figura 6.3 <i>Processo produtivo do hidrogênio verde</i> 58	Tabela 1.1 <i>Unidades de Conservação</i> 15, 16	Tabela A.3 <i>Artigos técnicos e científicos abordando a legislação técnica e ambiental</i> 65
Figura 6.4 <i>Perfil de atuação dos empregos diretos gerados pelo setor de energia solar</i> 59	Tabela 1.2 <i>Terras indígenas</i> 19	Tabela A.4 <i>Leis, decretos, portarias e normas que regulamentam a atividade de geração de energia</i> 66
Figura 6.5 <i>Localidades representativas usadas nos gráficos de variabilidade</i> 59	Tabela 1.3 <i>Terras quilombolas</i> 19	
Figura 6.6 <i>Gráficos da variabilidade climática do recurso solar</i> 60	Tabela 1.4 <i>Principais plantas de geração fotovoltaica em operação</i> 21	
Figura 6.7 <i>Mapas do desvio padrão</i> 61	Tabela 2.1 <i>Principais processos físicos usados no registro de radiação solar</i> 27	
Qd. Diagrama de dispersão 41	Tabela 2.2 <i>Relevância relativa das etapas de instalação, operação e manutenção de uma estação solarimétrica</i> 30	
Qd. Estações solarimétricas <i>Padrão BSRN, Padrão EPE, Padrão INMET</i> 38	Tabela 3.1 <i>Frequência temporal de coleta de imagens no período considerado para o Atlas Solarimétrico</i> 35	
	Tabela 3.2 <i>Percentual de dados aprovados após processo de qualificação</i> 39	



REFERÊNCIAS

- Agência Executiva de Gestão de Águas.
Atualização do plano estadual de recursos hídricos da Paraíba - PERH/PB-2020.
- Agência Executiva de Gestão de Águas.
Relatório Final Consolidado do PERH-PB. Disponível online em http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/wp-content/uploads/2016/11/PE_07.pdf. 2017. Consulta em dezembro de 2022.
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA. Massas d'água. Disponível online em <https://dados.ana.gov.br/dataset/>. Acessado em dezembro 2022.
- Agencia Nacional de Energia Eletrica – ANEEL, 2021. BDGD - Base de Dados Geografica da Distribuidora conforme PRODIST, “Modulo 10 – Sistema de Informacao Geografica Regulatorio”, 2021. Disponível online em ftp://ftp.aneel.gov.br/srd/LAI/BDGD_LAI (mediante solicitação de acesso - dados abertos). Acessado em dezembro de 2022.
- Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Sistema de Informações de Geração (SIGA). Disponível online em <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjo1Njc4OGYyYjQtYWZmZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>. Acessado em janeiro de 2023.
- Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Geração distribuída. <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjo1Njc4OGYyYjQtYWZmZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>. Acessado em janeiro de 2023.
- Al Guarni, H. Z., Awasthi, A. Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia. *Applied Energy*, 206, p. 1225-1240, 2017.
- Alvares, C. A., Stape, J.L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M.; Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. Shapefiles disponíveis online em <https://forest-gis.com/2015/10/classificacao-climatica-de-koppen-geiger-em-shapefile.html/>. Acessado em dezembro 2022.
- Anderson, G. P.; Clough, S. A.; Kneizys, F. X.; Chetwynd, J. H., Jr.; Shettle, E. P. Atmospheric Constituent Profiles (0–120 km); Technical Report AFGL-TR-86-0110; Air Force Geophysical Laboratory: Hanscom AFB, MA, USA, 1986.
- ASTM. American Society for Testing and Materials. Reference Air Mass 1.5 Spectra. Disponível online em <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html>. Acessado em dezembro de 2022.
- Atlas eólico : Paraíba / elaborado por Camargo Schubert Engenheiros Associados, Associação Técnico Científica Ernesto Luiz de Oliveira Junior (ATECEL) ; dados do modelo mesoescala fornecidos por AWS Truepower. Curitiba, PR: Camargo Schubert; Campina Grande, PB: ATECEL: UFCG, 2014. Disponível online em <https://mapaeolico.pb.gov.br/>. Acessado em dezembro de 2022.
- Balanco Energético Nacional - BEN 2022: Ano base 2021. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível online em <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes->

- dados-abertos/publicacoes/
PublicacoesArquivos/ publicacao-675/
topico-638/BEN2022.pdf. Acessado em
dezembro de 2022.
- Casagrande, M. S. G.; Martins, F. R.; Rosário,
N. E.; Lima, F. J. L.; Gonçalves, A. R.; Costa,
R. S.; Zarzur, M.; Pes, M. P.; Pereira, E. B.
Numerical Assessment of Downward
Incoming Solar Irradiance in Smoke
Influenced Regions—A Case Study in
Brazilian Amazon and Cerrado. *Remote
Sensing*, 2021, 13, 4527. DOI: 10.3390/
rs13224527.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente -
CONAMA. Resolução nº 237 DE
19/12/1997. Disponível online em [https://
www.legisweb.com.br/legislacao/?
id=95982](https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=95982). Acessado em dezembro 2022.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente -
CONAMA. Resolução nº 275 de
25/04/2001. Disponível online em [https://
www.legisweb.com.br/legislacao/?
id=97507](https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=97507). Acessado em dezembro 2022.
- Costa, R. S.; Martins, F. R.; Pereira, E.B.
Atmospheric aerosol influence on the
Brazilian solar energy assessment:
Experiments with different horizontal
visibility bases in radiative transfer
model. *Renewable Energy* 2016, 90, 120–
135. DOI: 10.1016/j.renene.2015.12.053.
- CRESESB. Potencial Solar – SUNDATA v 3.0.
Centro de Referência para as Energias
Solar e Eólica Sergio de S. Brito, 2022.
Online: [http://www.cresesb.cepel.br/
index.php?section=sundata&](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&).
- CRIA - Centro de Referência e Informação
Ambiental. 2023. Specieslink - simple
search. Disponível em: [http://
www.splink.org.br/index](http://www.splink.org.br/index).
- Darbyshire, E.; Morgan, W.T.; Allan, J. D.; Liu,
D.; Flynn, M. J.; Dorsey, J. R.; O’Shea, S. J.;
Lowe, D.; Szpek, K.; Marenco, F.; et al. The
vertical distribution of biomass burning
pollution over tropical South America
from aircraft in situ measurements
during SAMBBA. *Atmos. Chem. Phys.
Discuss.* 2018, 19, 5771– 5790. DOI:
10.5194/acp-19-5771-2019.
- DGOA 017/2022 NT-EPE-DEASMA- 019/2022.
Disponível online em [https://
www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-
dados-abertos/publicacoes/
PublicacoesArquivos/publicacao-598/
NT%20Conjunta%20Eletrobras%20EPE%
20Licenciamento%20UFV%20ver2022.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-598/NT%20Conjunta%20Eletrobras%20EPE%20Licenciamento%20UFV%20ver2022.pdf)
- Earth Resources Observation and Science
(EROS). United States Geological Survey
(USGS). Disponível em [https://
www.usgs.gov/centers/eros/science/
usgs-eros-archive-products-overview](https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-products-overview).
- ELETROBRAS, EPE. Nota Técnica Conjunta
Eletrobrás/EPE - Levantamento da legis-
lação para licenciamento ambiental de
empreendimentos de geração de
energia elétrica por fonte solar. NT
Eletrobrás DGOA 003/2021. NT-EPE-DEA-
SMA-006-2021. Rio de Janeiro:
Eletrobrás, 85p., 2021.
- ELETROBRAS. Legislação Ambiental de
interesse do setor elétrico. Rio de Janei-
ro, Eletrobrás, 459p. 2022.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Da-
dos georreferenciados de linhas de
transmissão. WebMap EPE. Acessado em
junho/2023. Disponível em [https://gise-
peprd2.epe.gov.br/WebMapEPE/](https://gise-peprd2.epe.gov.br/WebMapEPE/).
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética.
Empreendimentos Fotovoltaicos –
Instruções para solicitação de
cadastramento e habilitação técnica com
vistas à participação em leilões de
energia elétrica. Nº EPE-DEE-RE-
065/2013-r6_UFV. 2013. Disponível em:
[https://www.epe.gov.br/sites-pt/leiloes-
de-energia/Documents/EPE-DEE-RE-
065_2013_R6_UFV.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/leiloes-de-energia/Documents/EPE-DEE-RE-065_2013_R6_UFV.pdf)
- Ferreira, N. J.; Chan, C. S.; Satyamurty, P.
1990. Análise dos Distúrbios
Ondulatórios de Leste sobre o Oceano
Atlântico Equatorial Sul. In: Congresso
Brasileiro de Meteorologia, Salvador, BA.
- FLORA E FUNGA DO BRASIL. 2023. Jardim
Botânico do Rio de Janeiro. Disponível
em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>.
- Francisco, P. R. M.; Santos, D. Climatologia
do Estado da Paraíba. Campina Grande,
PB: EDUFPG, 2017.
- Fundação Nacional do Índio - FUNAI. Terras
indígenas. Disponível online em [https://
www.gov.br/funai/pt-br/atuacao/terras-
indigenas/geoprocessamento-e-mapas/](https://www.gov.br/funai/pt-br/atuacao/terras-indigenas/geoprocessamento-e-mapas/).
Acessado em dezembro 2022.
- Gordon, I. E.; Rothman, L. S.; Hill, C.;
Kochanov, R. V.; Tan, Y.; Bernath, P. F.;
Birk, M.; Boudon, V.; Campargue, A.;
Chance, K. The HITRAN2016 molecular

- spectroscopic database. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2017, 203, 3–69. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2017.06.038.
- Guarnieri, M. V. Usinas solares fotovoltaicas com seguimento em um eixo no Brasil: aspectos da construção, custos e expectativa de desempenho. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.
- Gueymard, C. A review of validation methodologies and statistical performance indicators for modeled solar radiation data: Towards a better bankability of solar projects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, p. 1024-1034, 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.117.
- Gueymard, C. The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models. *Sol. Energy* 2004, 76, 423–453. DOI: 10.1016/j.solener.2003.08.039.
- Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (WMO- no.8). World Meteorological Organization - WMO. 2018. ISBN: 978-92-63-10008-5. Disponível online em https://library.wmo.int/index.php?id=12407&lvl=notice_display#.Y0dNyXbMJJEY.
- Hoffmann, A. S., Carvalho, G. H., Cardoso Jr., R. A. F. Environmental licensing challenges for the implementation of photovoltaic solar energy projects in Brazil, *Energy Policy*, 132, p. 1143-1154, 2019. DOI: 10.1016/j.enpol.2019.07.002.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Bases cartográficas contínuas. Disponíveis online em ftp://geoftp.ibge.gov.br/cartas_e_mapas/bases_cartograficas_continuas/bc250/versao2021/. Acessado em dezembro de 2022.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Centro de Documentação e Disseminação de Informações / Coordenação de Projetos Especiais. *Grade Estatística - 2016*. Disponível online em ftp://geoftp.ibge.gov.br/recortes_para_fins_estatisticos/grade_estatistica/censo_2010/. Acessado em dezembro 2022.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Divisão regional do Estado da Paraíba. Informações disponíveis online em ftp://geoftp.ibge.gov.br/organizacao_do_territorio/malhas_territoriais/malhas_municipais/municipio_2021/UFS/PB. Consulta em dezembro de 2022.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. População estimada em 2021. Diretoria de Pesquisas (DPE) / Coordenação de População e Indicadores Sociais (COPIIS). Disponível online em <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6579>. Acessado em dezembro 2022.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Produção Agrícola - Lavoura temporária. Informações disponíveis online em <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/pesquisa/14/10193>. Consulta em dezembro de 2022.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Produto Interno Bruto dos Municípios. Disponível online em <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9088-produto-interno-bruto-dos-municipios.html>. Acessado em dezembro 2022.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Produto Interno Bruto dos Municípios. Informações disponíveis online em <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9088-produto-interno-bruto-dos-municipios.html?t=series-historicas&c=3548500>. Consulta em dezembro de 2022.
- Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - ICMBIO. Ministério do Meio Ambiente - MMA. Disponível online em <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/servicos/geoprocessamento/mapa-tematico-e-dados-geoestatisticos-das-unidades-de-conservacao-federais/>. Acessado em dezembro 2022.
- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA. Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil. Plataforma Digital. Disponível online em <http://www.atlasbrasil.org.br/acervo/atlas>. Acessado em dezembro de 2022.
- Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE. Banco de Dados de Imagens (DISSM). Disponível online em <http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes16.formulario.logic>. Acessado em dezembro de 2022.

- Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE. Base de dados da Rede SONDA. Disponível online em <http://sonda.ccst.inpe.br/>. Acessado em maio de 2022.
- Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE. Código do modelo computacional baseado em satélite BRASIL-SR. Disponível em <http://labren.ccst.inpe.br/brasil-sr-pt.html>. Acessado em abril 2022.
- Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional - IPHAN. Sistema integrado de Conhecimento e Gestão. Sítios arqueológicos. Disponível online em <https://sicg.iphan.gov.br/sicg/pesquisarBem>. Acessado em dezembro 2022.
- Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária - INCRA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Terras quilombolas. Disponível online em https://certificacao.incra.gov.br/csv_shp/export_shp.py/. Acessado em dezembro 2022.
- Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. Dados da rede de PCDs (Plataformas de Coleta de Dados). Disponível online em <https://bdmep.inmet.gov.br>. Acessado em abril 2022.
- Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. Dados de precipitação e temperatura extraídos das estações automáticas. Disponível online em <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acessado em dezembro 2022.
- International Organization for Standardization - ISO. Normas para medição de irradiância. Disponível online em <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9060:ed-2:v1:en>. Acessado em dezembro de 2022.
- ISO 9060. Solar energy — Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation. International Organization for Standardization, 18pp., 2018.
- Kousky, V. E. Frontal influences on Northeast Brazil. *Monthly Weather Review*, v.107, n.9, p.1140-1153, 1979.
- Luna, M. A. R., Cunha, F. B. B, Mousinho, M. C. A. M., Torres, E. A. Solar Photovoltaic Distributed Generation in Brazil: The Case of Resolution 482/2012. *Energy Procedia*, 159, p. 484-490, 2019. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.12.036.
- Martins, F. R. e Pereira, E. P. Energia solar: estimativa e previsão de potencial solar. Curitiba: Editora Appris, 80pp, 2019.
- Martins, F. R. Influência do processo de determinação da cobertura de nuvens e dos aerossóis de queimada no modelo físico de radiação BRASIL-SR. Tese de Doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001.
- Martins, F. R.; Pereira, E. B.; Silva, S.; Abreu, S. L.; Colle, S. Solar energy scenarios in Brazil, Part one: Resource assessment. *Energy Policy*, 2008, 36, 2853–2864. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.02.014.
- Martins, F.; Pereira, E. B. Parameterization of aerosols from burning biomass in the Brazil-SR radiative transfer model. *Solar Energy*, 2006, 80, 231–239. DOI: 10.1016/j.solener.2005.03.008.
- Molion, L. C. B. and Bernardo, S. O. Uma revisão da dinamica das chuvas no nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 17, 1-10, 2002.
- Molion, L. C. B.; Bernardo, S. O. Dinamica das Chuvas no Nordeste Brasileiro. In: XI congresso Brasileiro de Meteorologia, 2000, Rio de Janeiro. Anais do XI CBMET. Rio de Janeiro, RJ: SBMET, 2000.
- NASA. Topografia. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Disponível online em <https://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/>. Acessado em dezembro de 2023.
- Neves, G.; Vilela, W.; Pereira, E.; Yamasoe, M.; Nofuentes, G.; 2021. "Spectral impact on PV in low-latitude sites: The case of southeastern Brazil," *Renewable Energy*, Elsevier, vol. 164(C), pages 1306-1319. DOI: 10.1016/j.renene.2020.10.128
- Pereira, E. B.; Martins, F. R.; Gonçalves, A. R.; Costa, R.S.; Lima, F. L.; Rütther, R.; Abreu, S. L.; Tiepolo, G. M.; Pereira, S. V.; Souza, J. G. Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2nd ed.; INPE: São José dos Campos, Brasil, 2017; p. 88. DOI: 10.34024/978851700089
- Pereira, R. C. Políticas públicas para expansão da energia solar fotovoltaica: um estudo dos principais programas de

- incentivo da tecnologia no Brasil. 2019. 74f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2019
- Schaaf, C. B.; Gao, F.; Strahler, A. H.; Lucht, W.; Li, X.; Tsang, T.; Strugnell, N.C.; Zhang, X.; Jin, Y.; Muller, J. P.; et al. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. *Remote Sens. Environ.* 2002, 83, 135–148. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00091-3.
- Schreier, F.; García, S. G.; Hochstaffl, P.; Städt, S. Py4CATS-Python for computational Atmospheric spectroscopy. *Atmosphere* 2019, 10, 262. DOI: 10.3390/atmos10050262.
- SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. Inventário Florestal Nacional: principais resultados: Paraíba. Brasília, DF: MAPA, 2019. 84p. (Série Relatórios Técnicos - IFN).
- Severo, T. C., Pan, A. C., Rocha, C. L. P. Programa RS Solar Para Apoio à Cadeia Fotovoltaica e de Eficiência Energética do Rio Grande do Sul. *Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar*, 2022. Florianópolis: Associação Brasileira de Energia Solar, 2022.
- Silva, G. D. P., Magrini, A., Tolmasquim, M. T., Castelo Branco, D. A. Environmental licensing and energy policy regulating utility-scale solar photovoltaic installations in Brazil: status and future perspectives, *Impact Assessment and Project Appraisal*, 37:6, 503- 515, 2019. DOI: 10.1080/ 14615517.2019.1595933.
- Simón-Martin, M.; Montserrat, D.; Tristan, C. (2016) - Shadow-band radiometer measurement of diffuse solar irradiance: Calculation of geometrical and total correction factors, *Solar Energy*. Volume 139, Pages 85-99. DOI: 10.1016/j.solener.2016.09.026
- SOLERGO. Projeto de sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição ou isolados. 2022. Disponível online em <https://www.electrographics.com.br/products/img/folders/folder-solergo-20220629151743.pdf>.
- Viana, S. W., Basso, J. D. Energia solar fotovoltaica, sua expansão e a utilização das políticas públicas. 2021. 74f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Gestão Empresarial) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Câmpus Porto Alegre, 2021.
- Wiscombe, W. J.; Evans, J. W. Exponential-sum fitting of radiative transmission functions. *J. Comput. Phys.* 1977, 24, 416–444. DOI: 10.1016/0021-9991(77)90031-6.
- Yamasoe, M. A. e Corrêa, M. P. *Processos Radiativos na Atmosfera*. São Paulo: Oficina Textos, 2016.

SECRETARIA DE ESTADO
DA INFRAESTRUTURA E
DOS RECURSOS HÍDRICOS



GOVERNO
DA PARAÍBA



Clique e acesse o
Atlas Solarimétrico da Paraíba