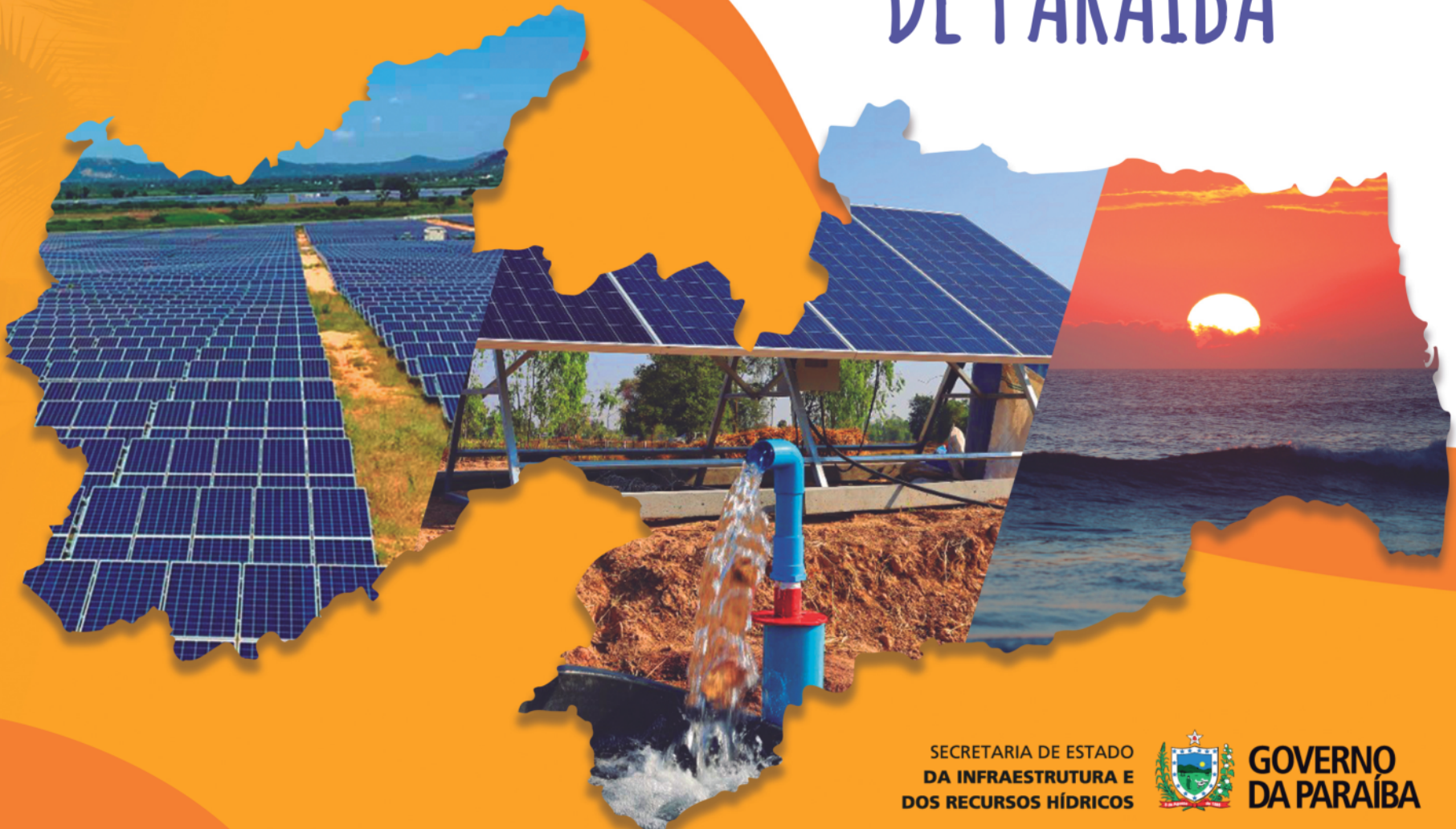




ATLAS SOLARIMÉTRICO DE PARAÍBA



SECRETARIA DE ESTADO
DA INFRAESTRUTURA E
DOS RECURSOS HÍDRICOS



GOVERNO
DA PARAÍBA



ATLAS SOLARIMÉTRICO DE PARAÍBA

SECRETARIA DE ESTADO
DA INFRAESTRUTURA E
DOS RECURSOS HÍDRICOS



GOVERNO
DA PARAÍBA

REALIZACIÓN

Gobierno de Paraíba

João Azevêdo Lins Filho
Gobernador

Lucas Ribeiro Novais de Araújo
Vicegobernador

Deusdete Queiroga Filho
Secretario de Infraestructura y Recursos Hídricos

Robson Barbosa
Secretario Ejecutivo de Energía

Wagner Ribeiro Clemente
Gerente Ejecutivo de Energía

Bruno Ribeiro de Araújo
Gerente Operativo de Eficiencia Energética

Edson Pessoa Carvalho
Consejero Técnico

ELABORACIÓN

Centro de Gestión de Investigación, Desarrollo e Innovación - CGPDI

Carlos Frederico de Angelis
Presidente

Danilo Borges Fernandes
Director Ejecutivo

Consultores Científicos

Fernando Ramos Martins

André Rodrigues Gonçalves

Rodrigo Santos Costa

Gerson Máximo Tiepolo

Enio Bueno Pereira

Modelación de la Transferencia Radiativa

Madeleine Sanchez Gácita Casagrande

Francisco José Lopes de Lima

Vinicius Rogério da Rocha

Antonio Mauricio Zarzur

Helvécio Bezerra Leal Neto

Adquisición y procesamiento de datos

Guilherme Baggio Martins Machado

Marcelo Pizzuti Pes

Sistema de informaciones geográficas

Silvia Vitorino Pereira

Herramienta Web

K2 Sistemas

Datos solarimétricos medidos en superficie

Instituto Nacional de Meteorología (INMET)

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Instituto Federal de Pernambuco (IFPE)

Casa dos Ventos

REVISIÓN TÉCNICA

Centro de Energías Alternativas Renovables (CEAR) - Universidad Federal de Paraíba (UFPB)

Flavio da Silva Vitorino Gomes

João Marcelo Dias Ferreira

Kleber Carneiro de Oliveira

NÚCLEO EDITORIAL

Diseño gráfico, edición e ilustraciones

Silvia Vitorino Pereira - CGPDI

Carátula

Máximo Serpa - SECOM-PB

Revisión gráfica

Janildes Andrade - ASCOM/SEIRH-PB

Fotografía

Pulsar Imagens

Depositphotos

WEG

Impresión

TBN Gráfica & Editora

**Catalogación internacional en los datos de publicación
(CIP)
(Cámara Brasileña del Libro, SP, Brasil)**

Paraíba (Estado). Secretaría de Estado de
Infraestructuras y Recursos Hídricos

Atlas solarimétrico de Paraíba / Secretaría de
Estado de Infraestructuras y Recursos Hídricos ;
[organización Danilo Borges Fernandes, Carlos
Frederico de Angelis]. -- Cachoeira Paulista, SP :
Centro de Gestión de la Investigación, el Desarrollo
y la Innovación - CGPDI, 2023.

Varios colaboradores.

Bibliografía.

ISBN 978-65-980791-0-9

1. Atlas 2. Radiación solar 3. Receptores
sensoriales 4. Teledetección - Imágenes
I. Fernandes, Danilo Borges. II. Angelis,
Carlos Frederico de. III. Título.

23-163995

CDD-551.5271098133

Índices para el catálogo sistemático:

1. Atlas solarimétrico : Medición : Paraíba :
Geología 551.5271098133

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecaria - CRB-1/3129



AGRADECIMIENTO

Este Atlas fue desarrollado con alto rigor técnico y su realización se debe en gran medida a la colaboración entre diferentes personas, empresas e instituciones, destacándose entre ellos:

Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais* – INPE) por compartir datos solarimétricos a través de su Red SONDA y por poner a disposición el código del modelo BRASIL-SR;

Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (*National Oceanic and Atmospheric Administration* - NOAA) de los EUA por poner a disposición las imágenes satelitales (GOES16 y proyecto GridSat);

Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (*National Aeronautics and Space Administration* - NASA) por poner a disposición datos de aerosol del producto MERRA-2;

Instituto Federal de Pernambuco (IFPE) por poner a disposición datos a través de la Red Solarimétrica de Pernambuco;

Instituto Nacional de Meteorología (INMET) por poner a disposición datos de superficie provenientes de su red de Plataformas de Recopilación de Datos (Plataformas de coleta de dados - PCD);

Casa de los Vientos por poner a disposición datos de estaciones solarimétricas en el Estado de Paraíba;

Centro de Energías Alternativas y Renovables de la Universidad Federal de Paraíba (CEAR/UFPB) por su apoyo en la especificación y revisión de este Atlas;

Agencia Ejecutiva para la Gestión del Agua (AES/A), **Instituto del Patrimonio Histórico y Artístico del Estado de Paraíba** (IPHAEP), **Instituto Chico Mendes de Conservación de la Biodiversidad** (ICMBIO), **Departamento de Caminos y Carreteras del Estado de Paraíba** (DER), **Secretaría de Planificación y Gestión** (SEPLAG), **Superintendencia de Administración Ambiental** (SUDEMA), **Compañía de Energía del Estado de Paraíba** (Energisa Paraíba), **Secretaría Medio Ambiente y Sostenibilidad del Estado de Paraíba** (SEMAS), por poner a disposición datos ambientales y de infraestructura.



PRESENTACIÓN

Con una ubicación estratégica y privilegiada, Paraíba se caracteriza por ser una de las regiones con mayor incidencia de radiación solar en el mundo, alcanzando un nivel promedio anual de 5,73 kWh/m² por día, lo que proporciona al estado un potencial expresivo para la generación de electricidad limpia y renovable.

Con un enfoque en el desarrollo sustentable, el Gobierno del Estado de Paraíba ha apoyado iniciativas que promueven el uso de fuentes de energía renovables, no solo por sus beneficios ambientales, sino también para estimular la economía local y generar empleo, ingresos y calidad de vida para nuestra población.

Por eso, con el objetivo de consolidar la inserción de Paraíba en los escenarios nacional e internacional de inversiones en el sector, lanzamos el presente Atlas Solarimétrico, una herramienta que cuantifica e indica, a través de mapas

georreferenciados, las regiones más prometedoras en términos de recursos de energía solar. En el estado, incluyendo además la estimación del potencial técnico-económico.

El presente Atlas es totalmente interactivo y disponible en Internet, y constituye una herramienta importante para atraer proyectos de generación de energía.

Entre sus funcionalidades, la herramienta interactiva permite la consulta de datos de irradiación, además de simulaciones de potencia y generación de sistemas fotovoltaicos para cualquier lugar de interés seleccionado, mediante recursos de búsqueda y selección que pueden ser ejecutados directamente sobre los mapas georreferenciados.

De esta manera, informaciones precisas para la toma de decisiones estratégicas y el

desarrollo de proyectos innovadores en energía solar estarán a disposición de inversores, pequeños y medianos empresarios locales, universidades, escuelas y organismos públicos, entre otros.

Paraíba continúa avanzando y consolidando su liderazgo económico, construyendo un futuro sostenible para nuestra gente de Paraíba.

João Azevêdo Lins Filho
Gobernador

SUMARIO

Introducción 1

El Estado de Paraíba 3

Geografía 3

Vegetación 6

Aspectos climáticos 6

Hidrografía 10

Unidades de conservación 13

Demografía 13

Economía 19

Sistema eléctrico 20

Fundamentos de la energía solar 24

Conceptos básicos de irradiación solar 24

Componentes de la irradiación solar 25

Medición de la radiación solar 27

Generación de electricidad a partir de la energía solar 29

Metodología de elaboración del Atlas Solarimétrico 32

Descripción del modelo BRASIL-SR 32

Datos de entrada 33

Procesamiento informático 36

Validación y análisis de incertidumbres 38

Control de calidad 39

Métricas estadísticas 39

Comparación de bases solarimétricas 42

Cartas solarimétricas 44

Irradiación global horizontal anual 45

Irradiación global horizontal mensual 46

Irradiación global en el plano inclinado a 10° anual 47

Irradiación global en el plano inclinado a 10° mensual 48

Irradiación directa normal anual 49

Irradiación directa normal mensual 50

Irradiación difusa horizontal anual 51

Irradiación difusa horizontal mensual 52

Potencial de generación fotovoltaica 53

Potencial teórico 53

Potencial técnico 53

Potencial económico I 54

Potencial económico II 54

Potencial económico III 54

Otros aspectos relevantes 57

Energía solar térmica (o termosolar) 57

Complementariedad (generación híbrida) 58

Hidrógeno verde 58

Energía solar y mitigación de emisiones 59

Tecnología, economía y creación de empleo 50

Variabilidad climática del potencial solar 60

Consideraciones finales 63

Anexo Legislación aplicada al sector energético 64

Índice de figuras, cuadros y tablas 68

Referencias 70





INTRODUCCIÓN

El avance tecnológico, la disponibilidad de informaciones científicamente establecidas y la escala de mercado produjeron las condiciones necesarias para el crecimiento y la consolidación de la energía solar, que es hoy una fuente de energía que más está creciendo en el mundo y en Brasil.

Durante las últimas dos décadas se han llevado a cabo proyectos de Investigación y Desarrollo Tecnológico (I+D) para satisfacer la fuerte demanda de datos solarimétricos confiables que permitan comprender la distribución espacial del recurso energético solar y su variabilidad temporal, considerando la atenuación por la atmósfera y los factores estacionales asociados al movimiento orbital de la Tierra alrededor del Sol. En 2006, el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE) lanzó la primera edición del Atlas Brasileño de Energía Solar con una metodología innovadora que utiliza datos satelitales, y que rápidamente se convirtió en Referencia informativa de esta fuente de energía en el país. El Atlas, en su segunda edición revisada y ampliada de 2017, señala al

Estado de Paraíba como una de las regiones del país con mayor potencial para la explotación de fuentes solares.

A lo largo de las dos últimas décadas se han implementado políticas públicas para incentivar la generación de electricidad a partir de fuentes de energía renovables con el objetivo de diversificar la matriz eléctrica del país, garantizando así una mayor seguridad energética, en línea con los compromisos internacionales de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

La primera planta de generación solar fotovoltaica conectada al SIN fue instalada en Brasil en agosto de 2011, en el municipio de Tauá, en el interior del estado de Ceará y, a partir de allí, comenzó la continua inserción de nuevos proyectos de plantas fotovoltaicas impulsadas, a primero, a través de subastas de energía y, después, a través del mercado libre. El hito que sentó las bases para el mercado de microgeneración y minigeneración de energía distribuida en Brasil fue la Resolución

Normativa de la Agencia Nacional de Energía Eléctrica (ANEEL) nro. 482/2012, revisada en 2015 por la Resolución Normativa nro. 687 para la regulación del segmento eléctrico de generación distribuida. Esta norma introdujo el sistema de compensación energética con las distribuidoras eléctricas, impulsando el crecimiento de la generación fotovoltaica en los hogares, los establecimientos comerciales e industriales y el sector público. La Ley 14.300, de 6 de enero de 2023, estableció el marco legal para la microgeneración y minigeneración distribuida, que regula el Sistema de Compensación de Energía Eléctrica (SCEE) y el Programa Social de Energías Renovables (PERS) para la generación distribuida.

La cadena de productos y servicios relacionados con la generación solar fotovoltaica se ha convertido en un importante vector de la economía local y regional, promoviendo la sostenibilidad ambiental e impulsando la calidad de vida y el desarrollo social a través de la generación de empleos calificados. Adicionalmente,

está promoviendo el acceso a la energía de la población aún no atendida por la red eléctrica convencional y la ampliación de los servicios básicos para la población de regiones remotas. Entendiendo la relevancia de estos aspectos, el Gobierno del Estado de Paraíba invirtió en la elaboración del Atlas de Energía Solar de Paraíba, difundido a través de este documento impreso y de la herramienta web interactiva. Los dos productos pretenden no apenas la difusión, sino también el amplio acceso interactivo a un conjunto de informaciones confiables sobre la disponibilidad de energía solar en el estado de Paraíba tanto para el público interesado en invertir en auto-generación residencial/comercial, como para inversores o profesionales del sector.

El presente Atlas se desarrolló basándose en tecnología moderna de modelación computacional y 10 años de datos satelitales. En su versión interactiva, permite la consulta y simulación del uso del recurso solar en cualquier local o zona del estado de Paraíba. Las incertidumbres en las estimaciones de la irradiación solar incidente se determinaron con base en datos observados en estaciones solarimétricas y meteorológicas terrestres operadas en la región por instituciones públicas y empresarios privados que colaboraron con este proyecto.

La interfaz gráfica de la herramienta interactiva WEB fue diseñada para ofrecer una experiencia intuitiva y amigable en plataformas digitales (computadora, teléfono

no inteligente o tableta), y proporciona informes que pueden ser impresos o almacenados en el equipo del usuario. Un tutorial interactivo está disponible para guiar a los usuarios en caso de dudas sobre los procedimientos de consulta o simulación.

Sin dudas, este Atlas Solarimétrico de Paraíba representa un hito importante en la difusión de información confiable y con base científica sobre el potencial de generación de energía solar en la región, incentivando así las inversiones y la creación de empleos, además de contribuir al esfuerzo mundial para reducir las de emisiones de gases de efecto invernadero a través de una fuente de energía inagotable, limpia y abundante en la región.





EL ESTADO DE PARAÍBA

Geografía

El estado de Paraíba está localizado entre las latitudes 6° 1' 33" S a 7° 9' 18" S y los meridianos 34° 47' 34" O e 38° 45' 56" O, como se muestra en la [Figura 1.1](#). El territorio de Paraíba está ubicado en el Nordeste brasileño, totalizando una superficie aproximada de 56.470 km² (alrededor del 0,7% del territorio brasileño). Sus fronteras se encuentran con el Océano Atlántico, al este, y el estado de Ceará al oeste. Las fronteras sur y norte están delimitadas por los estados de Pernambuco y Rio Grande do Norte, respectivamente.

El estado de Paraíba está compuesto por 223 municipios, de acuerdo con la división establecida por el Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (IBGE) a partir de 2017. Como se muestra en la [Figura 1.1](#), el territorio de Paraíba se divide en Regiones

Geográficas Intermediarias e Inmediatas, a fines de organización territorial y planificación de políticas públicas. Las regiones geográficas Intermediarias y sus respectivas regiones Inmediatas integrantes, se nombran a continuación:

- 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.

Desde el punto de vista socioeconómico, el Gobierno del Estado de Paraíba adopta la división clásica, que agrega sus principales espacios económicos en las siguientes zonas geoeconómicas: Litoral-Mata; Agreste-Brejo; y semiárido. La Zona Litoral-Mata corresponde a la mayor parte de la Región Intermediaria João Pessoa, definida por el IBGE en 2021 e incluye treinta de los 223 municipios del Estado, con una superficie de 5.242 km² (9,3% del territorio del Estado). La Zona Agreste-Brejo cubre casi en su

totalidad la Mesorregión de Campina Grande y parte de Patos, definida por el IBGE en 2021, agrupando 48 municipios con una superficie total de 7.684 km² (13,6% de la superficie total del Estado). La Zona Semiárida de Paraíba, según las recomendaciones del Ministerio de Integración Nacional y de la Superintendencia de Desarrollo del Nordeste (SUDENE), mediante Resolución del Consejo Deliberante (CONDEL) de la SUDENE nro. 107, de 27 de julio de 2017, La Nota Técnica Nro. 0023/2017-SUDENE/DPLAN/CGEP, de 20 de noviembre de 2017, y la Resolución SUDENE CONDEL Nro. 115, de 23 de noviembre de 2017, abarca una superficie aproximada de 51.306 km² (87,0% del área total del Estado) que abarca alrededor de 194 municipios.

La [Figura 1.2](#) presenta la topografía del Estado de Paraíba. El relieve del territorio de Paraíba se caracteriza por la existencia de una franja costera de tierras bajas, la Meseta de Borborema en la región central y la Meseta Occidental en el oeste del estado. Aproximadamente el 90% del territorio de Paraíba tiene altitudes inferiores a los 600 m, con las elevaciones más altas ubicadas a lo largo de la Meseta de Borborema, siendo

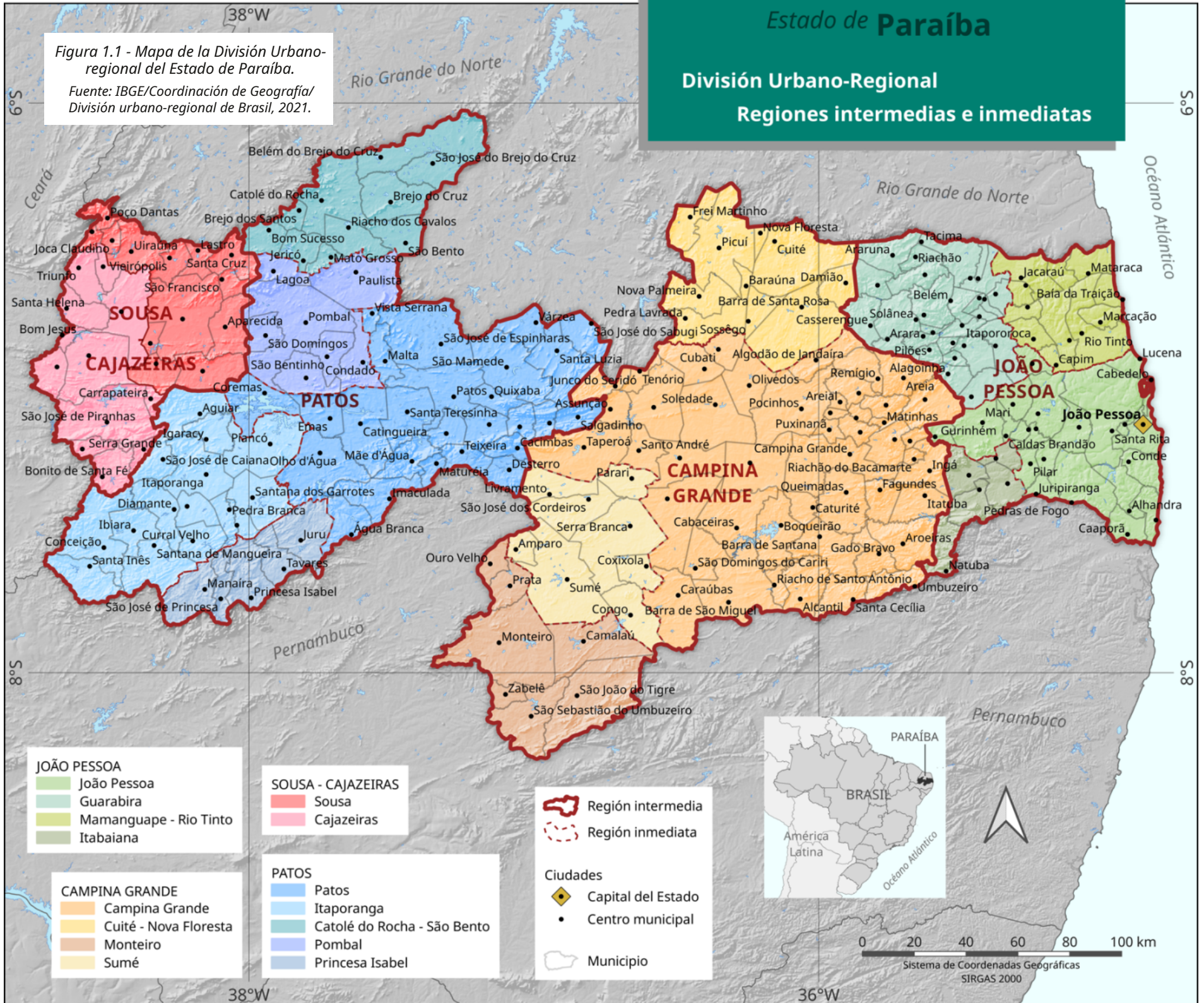
Estado de Paraíba

Divisão Urbano-Regional

Regiões intermediárias e imediatas

Figura 1.1 - Mapa de la División Urbano-regional del Estado de Paraíba.

Fuente: IBGE/Coordinación de Geografía/
División urbano-regional de Brasil, 2021.



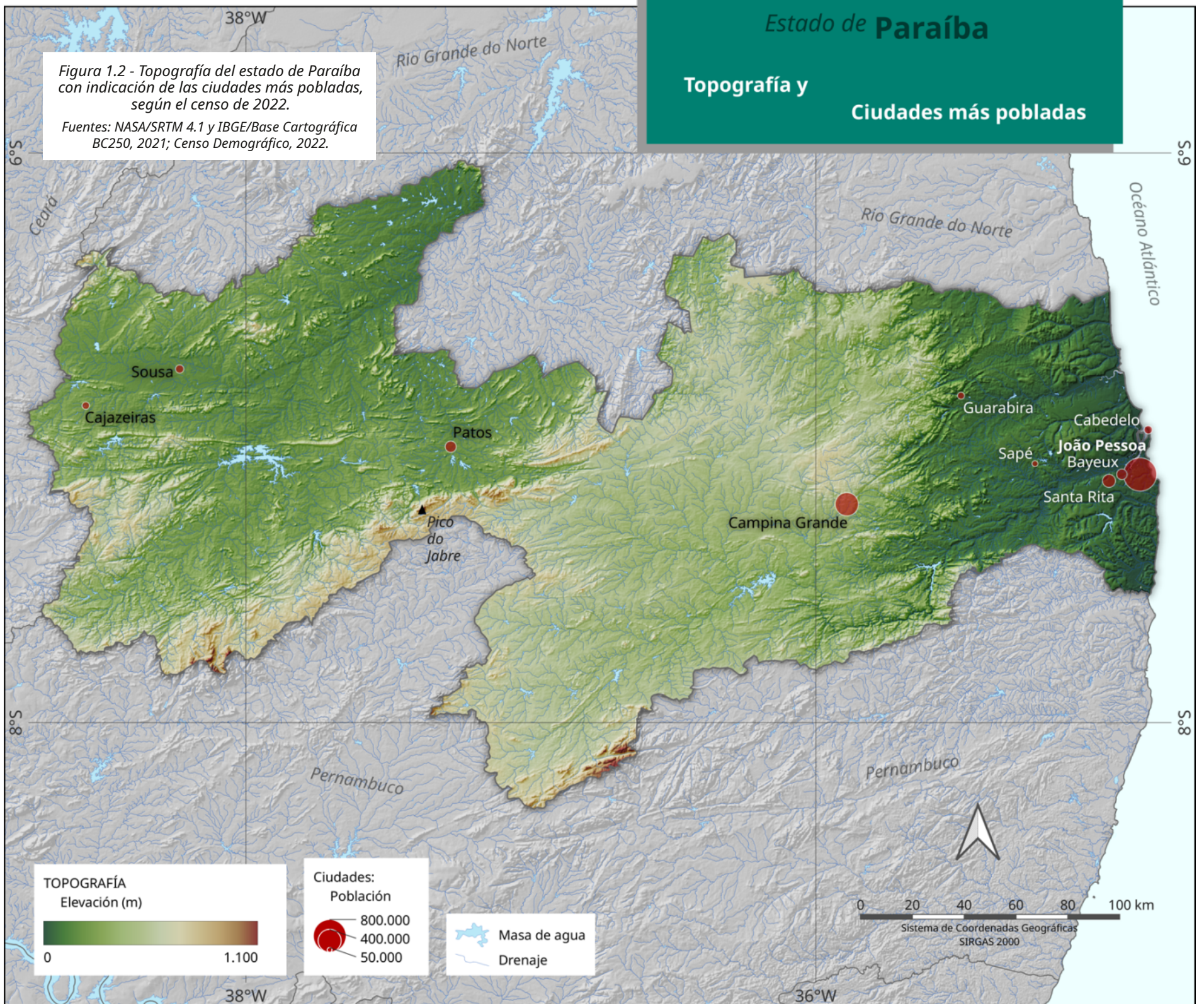
Estado de Paraíba

Topografía y

Ciudades más pobladas

Figura 1.2 - Topografía del estado de Paraíba con indicación de las ciudades más pobladas, según el censo de 2022.

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



el punto más alto el pico de Jabre, con una altitud de 1.090 m. La Costa Atlántica del estado tiene unos 120 km de largo, con formaciones tipo acantilado que presentan altitudes inferiores a los 60 m. La Depresión de Sertaneja domina el relieve en el occidente del Estado, caracterizado por la Caatinga y el clima semiárido, con elevaciones que varían entre 100 m y 400 m.

La **Figura 1.3** muestra el mapa de declives del territorio de Paraíba. La inclinación del terreno es un factor importante a la hora de elegir el sitio para plantas de generación fotovoltaica a gran escala. La literatura señala que se deben evitar lugares con pendientes mayores de 5 grados (o 8,7%) por aspectos relacionados con escurrimientos superficiales y riesgos de procesos de erosión del suelo (Guarnieri, 2017; Al Guarni y Awasthi, 2017).

Vegetación

Paraíba tiene una vegetación bastante diversa, reflejo de su riqueza ecológica, ya que abarca en su territorio los biomas Caatinga y Mata Atlántica, lo que le confiere una variedad de especies adaptadas a diferentes condiciones climáticas y ambientales.

Según el Servicio Forestal de Brasil (2019), Paraíba tiene al menos 11 tipos de vegetación de bosques, entre ellos Sabana Estépica Arbolada y Forestal (Caatinga), Bosque Semideciduo Estacional, Bosque

Abierto Ombrófilo, Sabana Arbolada y Forestal, Manglar, Palmeral, Arenales, Bosques Plantados y, por fin, Contactos, donde se presenta más de una tipología. La Sabana-Estépica (Caatinga) es la tipología predominante, cubriendo aproximadamente el 94% de las áreas de vegetación natural del estado (SFB, 2019).

Considerando el registro de especies de plantas, incluyendo angiospermas, helechos y licófitos, las bases de datos del Estado de Paraíba presentan diferencias significativas, ya que, mientras el Proyecto Flora y Hongos de Brasil (2023) indica la ocurrencia de 2390 especies, la plataforma de SpeciesLink (CRIA, 2023) registra un número mayor, 4318 especies.

Aspectos climáticos

Climatológicamente, el Nordeste brasileño (NEB) se caracteriza por la alta variabilidad temporal y espacial de las precipitaciones. Estas mismas características se verifican en nuestra zona de interés.

En la mayor parte del territorio de Paraíba, los sistemas atmosféricos más activos en la Zona Semiárida son la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), los Eventos de Oscilación del Sur (ENSO) – El Niño y La Niña, el Vórtice Ciclónico de Alto Nivel (VCAN) y los Sistemas Frontales (Frentes Fríos), que son los responsables de las precipitaciones distribuidas a lo largo del año. La acción de la ZCIT suele estar más

presente en la región Semiárida durante los meses de marzo y abril, precisamente el período en el que la estructura se posiciona sobre el hemisferio sur.

Entre los regímenes de precipitación típicos observados en el NEB, dos afectan al Estado de Paraíba: el primero se caracteriza por un trimestre lluvioso bien definido, entre los meses de febrero y mayo, y comprende las regiones de Sousa-Cajazeiras y Patos, así como las regiones más al oeste y al norte de la región de Campina Grande, siendo los principales fenómenos meteorológicos la ZCIT, la convergencia de la humedad proveniente de las brisas y las perturbaciones ondulatorias de los vientos Alisios (Perturbações Ondulatórias dos Alísios - POA) y la convección local (Molion y Bernardo, 2002).

El segundo régimen se caracteriza por un cuatrimestre lluvioso entre abril y julio, que comprende la parte este del estado (región de João Pessoa), causado por un aumento de la actividad de circulación de brisas y máxima convergencia de los vientos alisios con las brisas terrestres (Kousky, 1979).), por las perturbaciones ondulatorias del este (Ferreira et al., 1990) y por el desplazamiento de una zona de convergencia observada sobre la costa este del Nordeste (Molion y Bernardo, 2000). Estos son los principales sistemas climáticos responsables por las precipitaciones en el estado.

Como se muestra en la **Figura 1.4**, la distribución anual de la precipitación muestra una alta variabilidad espacial. La porción central del estado, incluyendo la región intermediaria de Campina Grande y

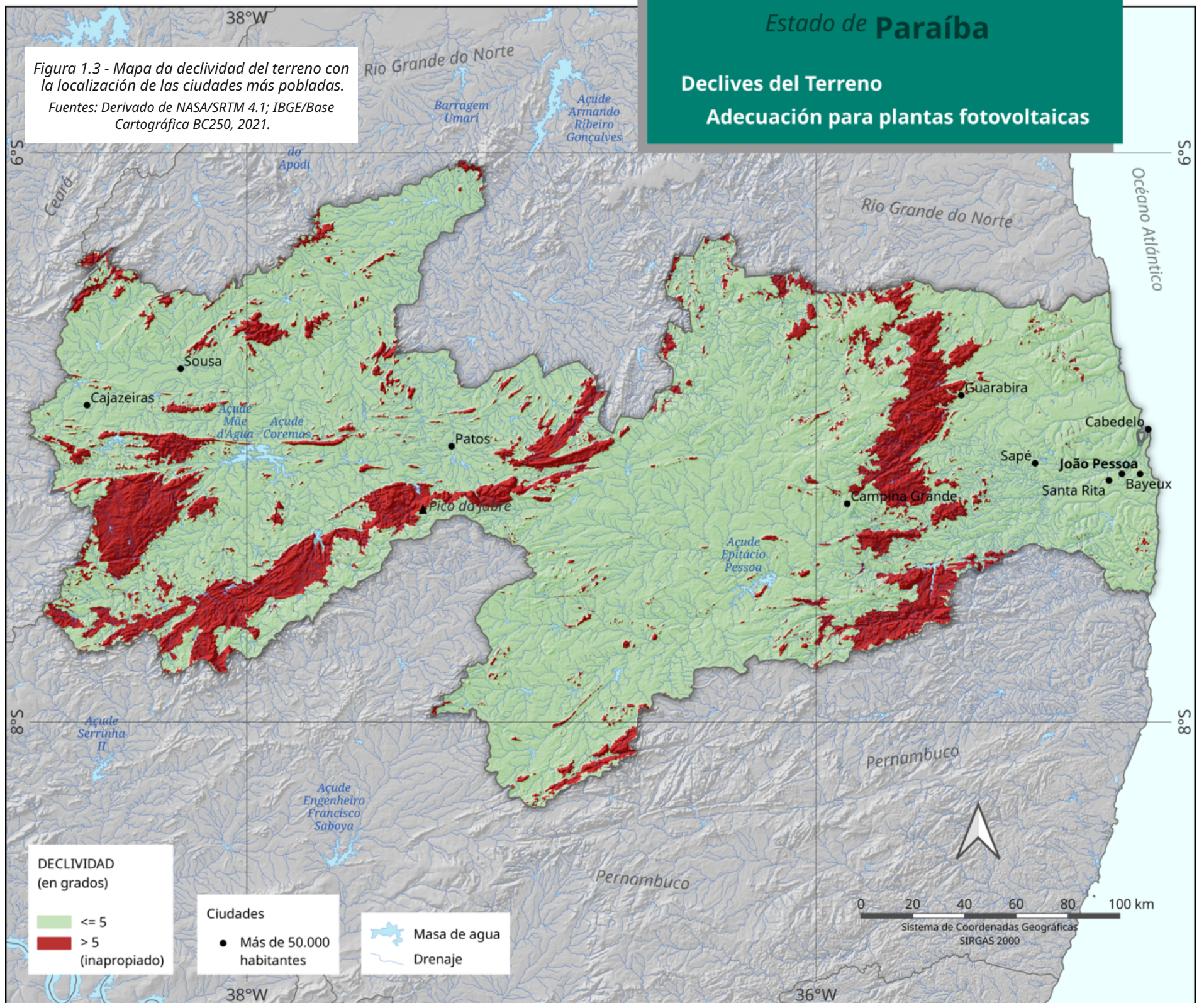
Estado de Paraíba

Declives del Terreno

Adecuación para plantas fotovoltaicas

Figura 1.3 - Mapa da declividade do terreno com a localização de las ciudades más pobladas.

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



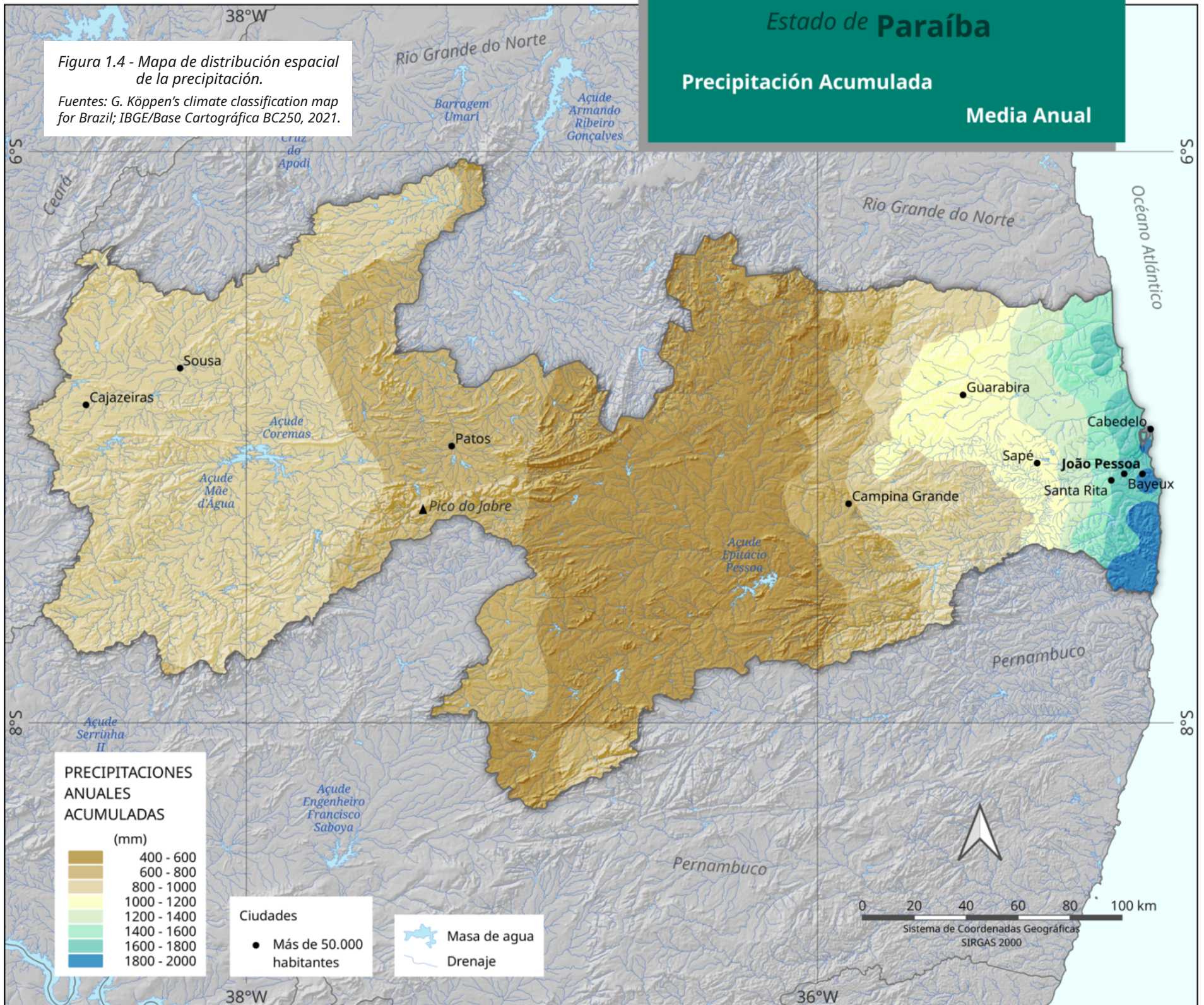
Estado de Paraíba

Precipitación Acumulada

Media Anual

Figura 1.4 - Mapa de distribución espacial de la precipitación.

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



Vegetación



Meseta de Borborema



Costa de Paraíba



Cacto quipá en Cariri, Paraíba



Bosque Atlántico



Caatinga



Manglares

el oeste de la región de João Pessoa, presenta los menores valores acumulados anuales de precipitación, entre 400 y 600 mm. La región de Sousa-Cajazeiras y el oeste de la región de Patos presentan precipitaciones anuales entre 800 y 1000 mm y las porciones más al este del estado presentan valores superiores a 700 mm, con énfasis en la región de João Pessoa, donde el acumulado anual varía de 1200 a 1600 mm. La precipitación es un elemento climático importante, ya que promueve la regulación de la temperatura, funcionando como control de amplitudes térmicas extremas.

Según Francisco y Santos (2017), la clasificación climática de Köppen muestra el predominio de los tipos As (clima tropical con verano seco) y Bsh (clima semiárido cálido) en el estado de Paraíba, como se muestra en la **Figura 1.5**. El tipo As se observa en el este de la región de João Pessoa, así como en una faja localizada en las regiones oeste y norte de la región de Patos. El tipo Bsh se puede encontrar en la región central del estado, abarcando la región de Campina Grande y el oeste de la región de João Pessoa. Es importante mencionar que en la faja central del estado las precipitaciones anuales oscilan entre 400 y 600 mm (**Figura 1.4**), siendo una de las regiones con menores valores de precipitaciones totales del país.

La **Figura 1.6** presenta la distribución espacial de la temperatura media anual diaria del aire próximo a la superficie. Analizando el mapa, se observa que los valores más bajos se encuentran en las

zonas de mayor altitud, destacándose la porción centro-norte de la región de Campina Grande. En el sector más al este de la región de Patos, donde predominan elevaciones bajas, se observan las más altas temperaturas medias diurnas del aire durante todo el año. Es importante mencionar que este patrón se puede observar en el Estado de Paraíba durante todo el año y que los meses con los valores de temperatura más bajos son junio, julio y agosto; las temperaturas más altas se observan en octubre, noviembre y diciembre.

Hidrografía

En el Estado de Paraíba existen ríos y arroyos descritos como cuerpos de agua lóticos o cursos de agua naturales (intermitentes, efímeros, perennes y semi-perennes), que tienen sus terminologías materializadas en el art. 2 de la Resolución del Consejo Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) nro. 141, del 10 de julio de 2012. La mayor parte de estos cuerpos de agua lóticos o cursos de agua naturales están representados en el marco de los cuerpos de agua de Paraíba, elaborado por el Ejecutivo Agencia para la Gestión del Agua (AESA) y actualizado en colaboración con la SUDEMA en 2014. Estos aspectos de la gestión de los recursos hídricos se materializan en la Directriz Nro. 201 del Sistema Estatal de Licencias para Actividades Contaminantes (SELAP) de 1988 y pueden ser consultados en la Base de

Datos Espacial (BDE) del SIG-WEB de la Agencia Ejecutiva para la Gestión del Agua (AESA), a través de la dirección electrónica <http://siegrh.aesa.pb.gov.br:8080/aesa-sig/>.

El gobierno de Paraíba estableció, en la Ley Complementar 168/2021, las microrregiones de Água y Alcantarillado de Alto Piranhas, Espinharas, Borborema y Litoral. La estructura toma en cuenta, entre otros aspectos, la delimitación de cuencas hidrográficas, la división de la infraestructura operativa, de los servicios básicos, de saneamiento, así como las particularidades sociales, económicas y políticas de los territorios involucrados.

Los bajos niveles de precipitaciones anuales son un factor limitante para las regiones hidrográficas de la Zona Semiárida de Paraíba, provocando menores caudales y escurrimientos superficiales en ríos y arroyos. En estas localidades la caracterización hidrográfica está marcada por la presencia de ríos y arroyos intermitentes y efímeros.

Las cuencas hidrográficas de Paraíba constituidas esencialmente por ríos perennes, son las de Abiaí, Guaju, Mamanguape, Miriri, Gramame, Camarutuba, así como la subcuenca hidrográfica del Bajo Paraíba.

El estado cuenta con numerosos embalses y represas construidas para mitigar el impacto de las estaciones secas, como, por ejemplo, las demandas difusas (abastecimiento humano de las poblaciones rurales, abrevadero de animales e irrigación).

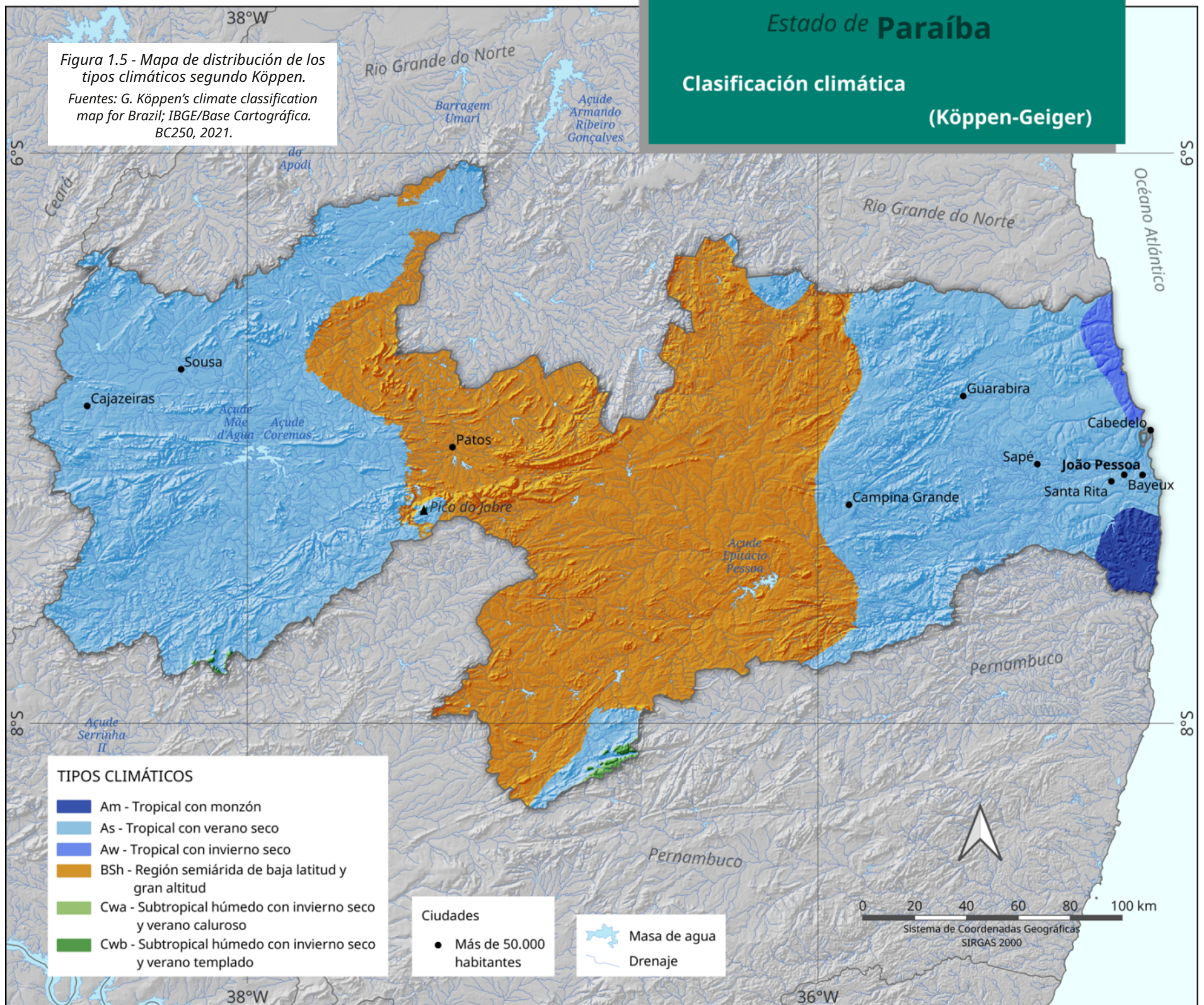
Estado de Paraíba

Clasificación climática

(Köppen-Geiger)

Figura 1.5 - Mapa de distribución de los tipos climáticos segundo Köppen.

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



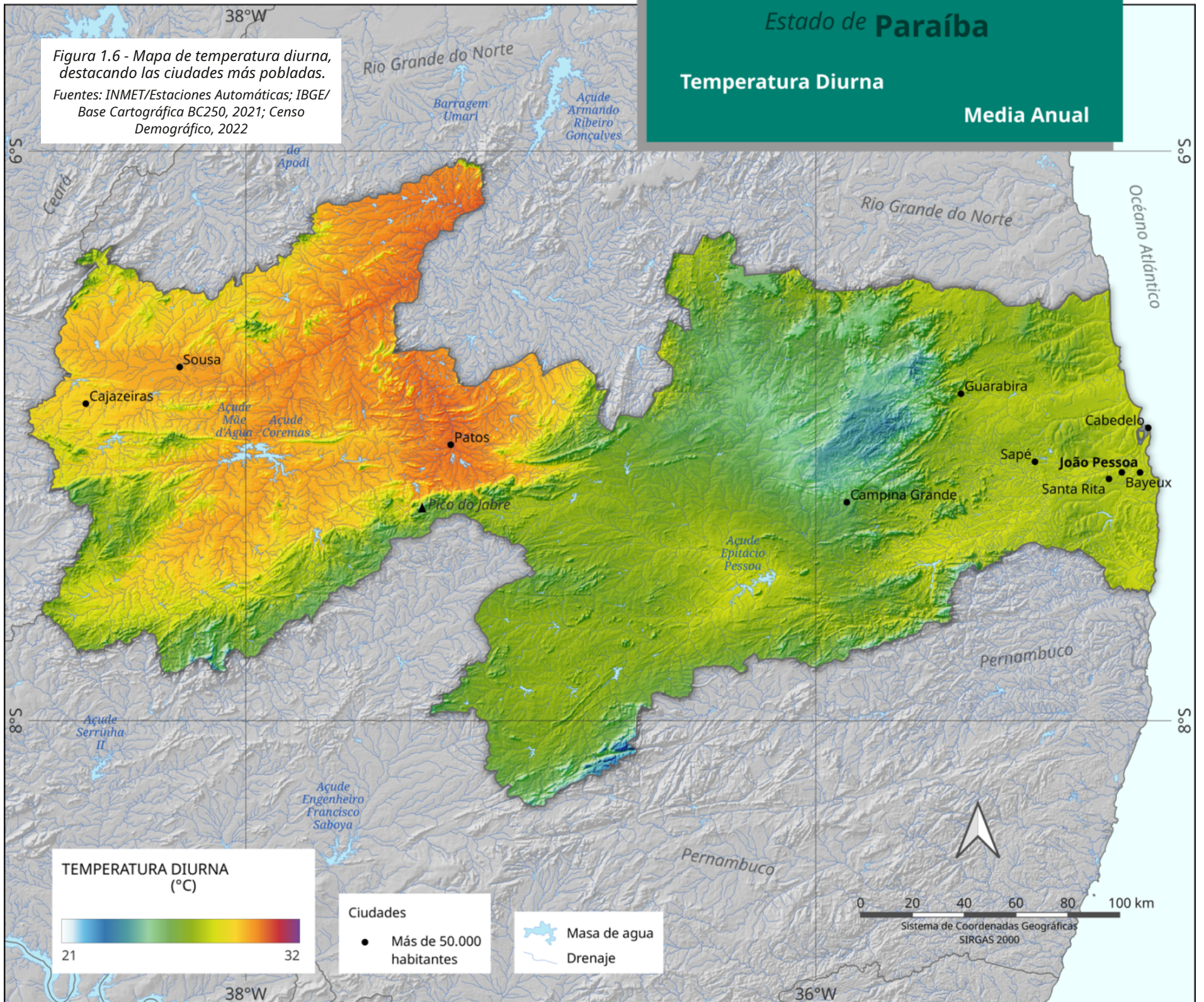
Estado de Paraíba

Temperatura Diurna

Media Anual

Figura 1.6 - Mapa de temperatura diurna, destacando las ciudades más pobladas.

Fuentes: INMET/Estaciones Automáticas; IBGE/ Base Cartográfica BC250, 2021; Censo Demográfico, 2022



TEMPERATURA DIURNA
(°C)



Ciudades

- Más de 50.000 habitantes

- Masa de agua
- Drenaje

0 20 40 60 80 100 km

Sistema de Coordenadas Geográficas
SIRGAS 2000

La Represa Coremas, la mayor del estado en términos de capacidad de almacenamiento, con aproximadamente 590 hm³ y ubicada en la cuenca del río Piancó, beneficia a 112 municipios repartidos en la Mesorregión del Sertão Paraibano (AESA, 2020). La **Figura 1.7** presenta el mapa de recursos hídricos en el estado de Paraíba utilizado en la preparación de los escenarios económicos que se describen más adelante en este documento.

Unidades de Conservación

Las Unidades de Conservación (UC) son territorios legalmente protegidos establecidos por el Gobierno y cuyo objetivo es conservar los recursos ambientales dentro de sus límites, incluidas las aguas jurisdiccionales, con características naturales relevantes. Para estas unidades es obligatorio un régimen de administración especial, al que se aplican garantías adecuadas de protección.

Estos territorios protegidos se clasifican en dos grupos, según su tipo de uso: Protección Integral y Uso Sostenible. Cada uno de estos grupos se subdivide en cinco y siete categorías, respectivamente, que se adaptan a la realidad ambiental de cada localidad.

En total hay 40 Unidades de Conservación en Paraíba, enumeradas en la **Tabla 1.1**, 17 de las cuales son gestionadas por el estado a través de la SUDEMA, otras 16 a

nivel federal por el Instituto Chico Mendes para la Conservación de la Biodiversidad (ICMBio) y, por fin, otras 7 que están a cargo de los municipios. Entre las UC, algunas son privadas. Denominadas Reservas Privadas de Patrimonio Natural, 9 son de nivel federal y 2 de nivel estatal. La **Figura 1.8** muestra el mapa con la localización de las unidades de conservación.

Actualmente, en Paraíba existen Unidades de Conservación que protegen paisajes naturales en los dos biomas existentes en el territorio – Bosque Atlántico y Caatinga – además de otras en el ecosistema marino.

En estos territorios protegidos se pueden desarrollar varias actividades, como, por ejemplo, la educación ambiental, la investigación científica, el eco-turismo y la extracción sostenible de recursos naturales renovables.

En las Unidades de Conservación se preserva un importante patrimonio natural, como la biodiversidad en peligro de extinción, como por ejemplo el palo del Brasil (pau-brasil, *Paubrasilia echinata*), con una importante población de esta especie protegida en la Estación Ecológica del mismo nombre, y que cuenta con uno de los bancos de germoplasma más importantes de esta especie en el país. Además, hay aves endémicas (Parque Estatal Mata do Pau-Ferro), pinturas rupestres (APA de las Onzas) y restos fósiles del período Cretáceo (Monumento Natural Valle de los Dinosaurios), también protegidos en UC.

Un papel importante de las Unidades de Conservación es preservar y fomentar la preservación de los conocimientos tradi-

cionales de las poblaciones humanas insertadas en el contexto socio-ambiental que las rodea. En la zona de amortiguamiento del Parque Estatal Marino Arena Roja (PEMAV), el proyecto conocido como Proyecto de Integración Comunitaria, apoyado por la GEF-Mar y firmado por un Acuerdo de Cooperación entre el Estado de Paraíba y el Ministerio del Medio Ambiente, apoya a las mujeres de la colonia de pescadores del municipio de Cabedelo, con actividades como la artesanía elaborada por las mariscadoras de la comunidad Renacer.

Conocer para conservar es una máxima afirmativa que orienta la gestión de las Unidades de Conservación. A través de la participación popular, la divulgación científica y la vivencia de estos espacios es crear en un futuro donde los ecosistemas se perpetuarán para las generaciones futuras.

Además de las Unidades de Conservación, el Estado de Paraíba tiene Tierras Indígenas demarcadas y en estudio y también Tierras Quilombolas, como se muestra en la **Figura 1.8** e las **Tablas 1.2** e **1.3**.

Demografía

Según el Censo Demográfico del IBGE realizado en 2022, la población del estado de Paraíba era de 3.974.495 habitantes, registrando una tasa de crecimiento del 0,45% anual. En el período comprendido entre 2010 y 2022. La densidad demográfica del estado es de 70.4 hab./km² (**Figura 1.9**).

Figura 1.7 - Mapa de los recursos hídricos del estado y las ciudades más pobladas.

Fuente: ANA/Masas de agua, 2021; IBGE/Base Cartográfica BC250, 2021; Censo Demográfico 2022.

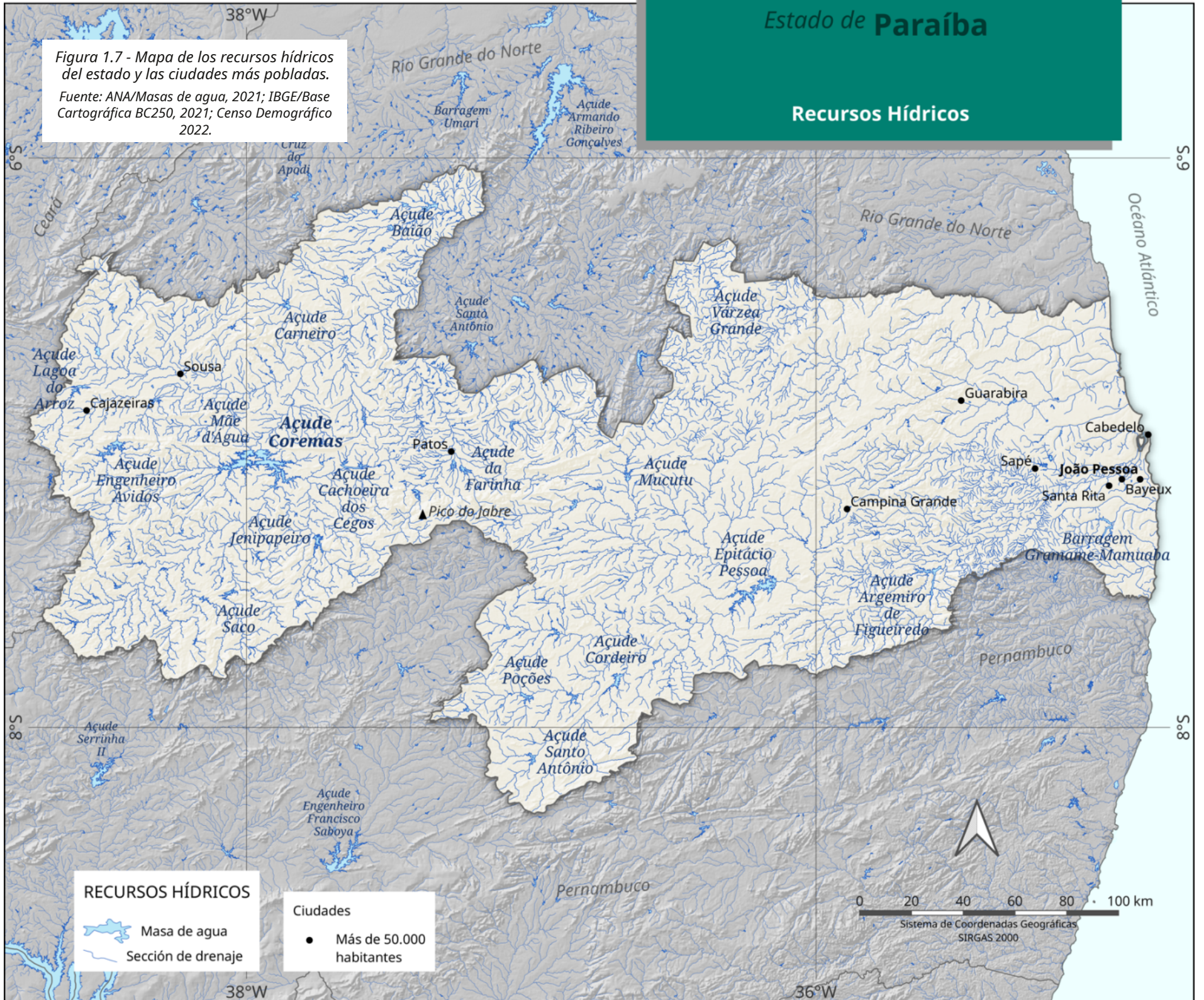


Tabla 1.1 - Unidades de Conservación en el Estado de Paraíba. La numeración (Id) indica la posición en el mapa.

Fuente: MMA (Ministerio de Medio Ambiente)/ICMBIO (Instituto Chico Mendes de Conservación de la Biodiversidad), 2021; SUDEMA, Prefecturas Municipales de Cabedelo, Cacimba de Areia, Cajazeiras, João Pessoa y Mataraca.

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

Continúa

Continuación de la Tabla 1.1

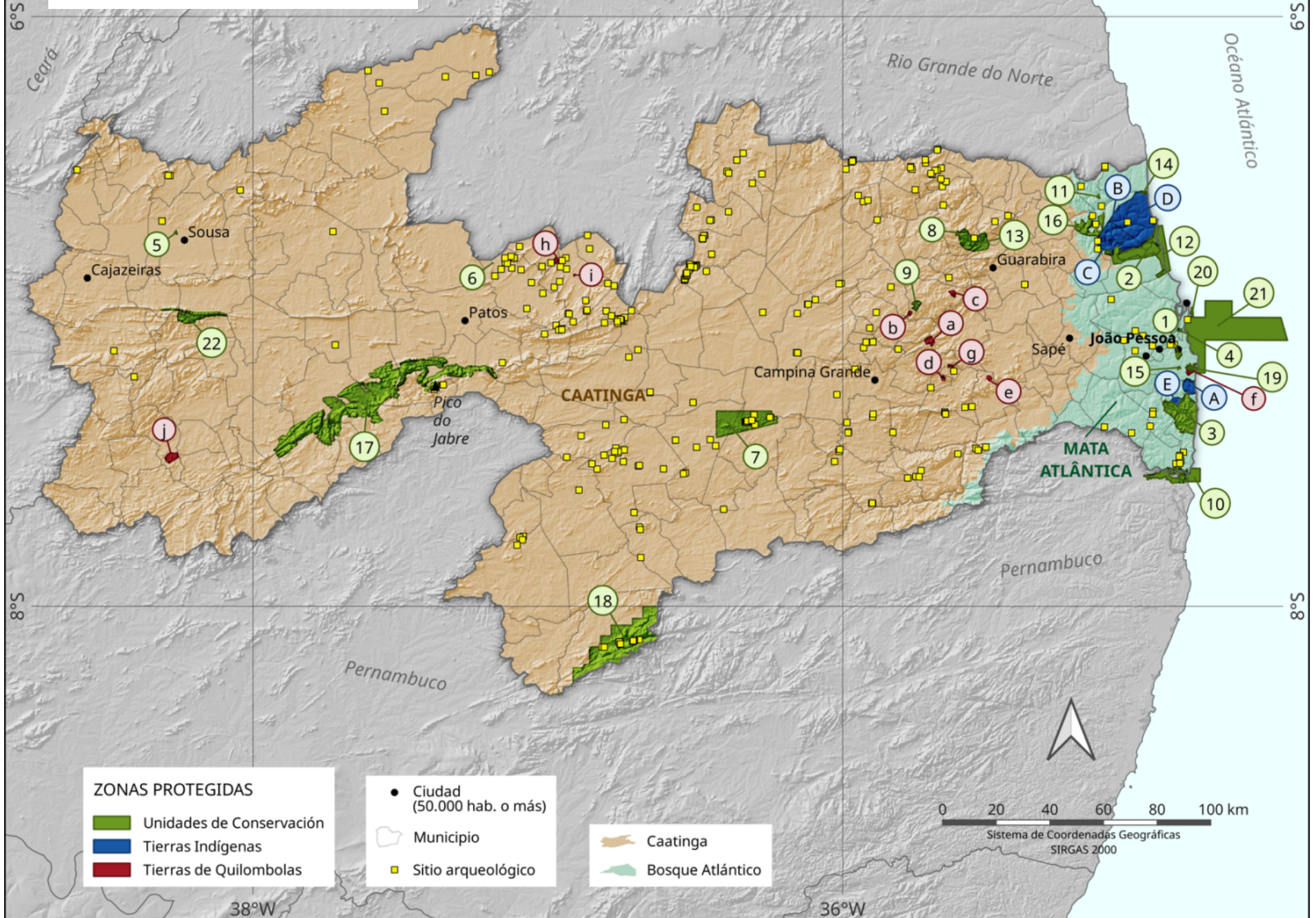
Id	Unidad de Conservación	Área (ha)	Grupo	Esfera	Acto jurídico	Municipio
9	Parque Estatal Mata del Pau Ferro	607	Protección Integral	Estatal	Decreto 26.098 de 04/08/2005	Areia
-	Parque Municipal de Cabedelo	50	-	Municipal	Decreto 12 de 16/04/2003	Cabedelo
-	Parque Municipal Lauro Xavier	22	-	Municipal	Ley 9.839 de 16/12/2002	João Pessoa
17	Parque Nacional de la Serra do Teixeira	61.095	Protección Integral	Federal	Decreto 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 del Cuiá	43	Protección Integral	Municipal	Decreto 7.517 de 17/04/2012	João Pessoa
1	Refugio de Vida Silvestre Mata do Buraquinho	518	Protección Integral	Estatal	Decreto 35.195 de 23/07/2014	João Pessoa
-	Reserva Medioambiental del Municipio de Cacimba de Areia	-	-	Municipal	Ley 256 de 17/12/2007	Cacimba de Areia
16	Reserva Biológica Guaribas	4.052	Protección Integral	Federal	Decreto 98.884 de 25/01/1990	Mamanguape, Rio Tinto
10	Reserva Extrativa Acaú-Goiana	6.677	Uso Sostenible	Federal	Decreto S/N de 26/09/2007	Caaporã, Pitimbu – PB Goiana – PE
6	Reserva Privada del Patrimonio Natural Armil	5	Uso Sostenible	Federal	Ordenanza 195 de 14/03/2018	São Mamede
-	Reserva Privada del Patrimonio Natural Engenho Gargaú	1.059	Uso Sostenible	Federal	Ordenanza 064 de 15/06/1994	Santa Rita
-	Reserva Privada del Patrimonio Natural Fazenda Almas	3.505	Uso Sostenible	Federal	Ordenanza 1343 de 07/08/1990	São José dos Cordeiros
-	Reserva Privada del Patrimonio Natural Fazenda Cabeça de Boi	34	Uso Sostenible	Estatal	Ordenanza 30 de 29/06/2009	Pocinhos
-	Reserva Privada del Patrimonio Natural Fazenda Pacatuba	267	Uso Sostenible	Federal	Ordenanza 110 de 29/12/1995	Sapé
-	Reserva Privada del Patrimonio Natural Fazenda Pedra d'Água	170	Uso Sostenible	Federal	Ordenanza 60 de 16/07/1999	Solânea
-	Reserva Privada del Patrimonio Natural Fazenda Santa Clara	751	Uso Sostenible	Federal	Ordenanza 29 de 28/02/2002	São João do Cariri
-	Reserva Privada del Patrimonio Natural Fazenda Tamanduá	325	Uso Sostenible	Federal	Ordenanza 110 de 31/07/1998	Santa Teresinha
-	Reserva Privada del Patrimonio Natural Fazenda Várzea	391	Uso Sostenible	Federal	Ordenanza 11 de 23/01/1998	Araruna
-	Reserva Privada del Patrimonio Natural Gurugy dos Paus Ferros	10	Uso Sostenible	Estatal	Ordenanza 002 de 22/02/2010	Conde
-	Reserva Privada del Patrimonio Natural Major Badú Loureiro	186	Uso Sostenible	Federal	Ordenanza 109 de 04/09/2001	Catingueira

Estado de Paraíba

Unidades de Conservación, Tierras indígenas y quilombolas

Figura 1.8 - Unidades de Conservación, Tierras Indígenas e Quilombolas (ver tabla para identificación).

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

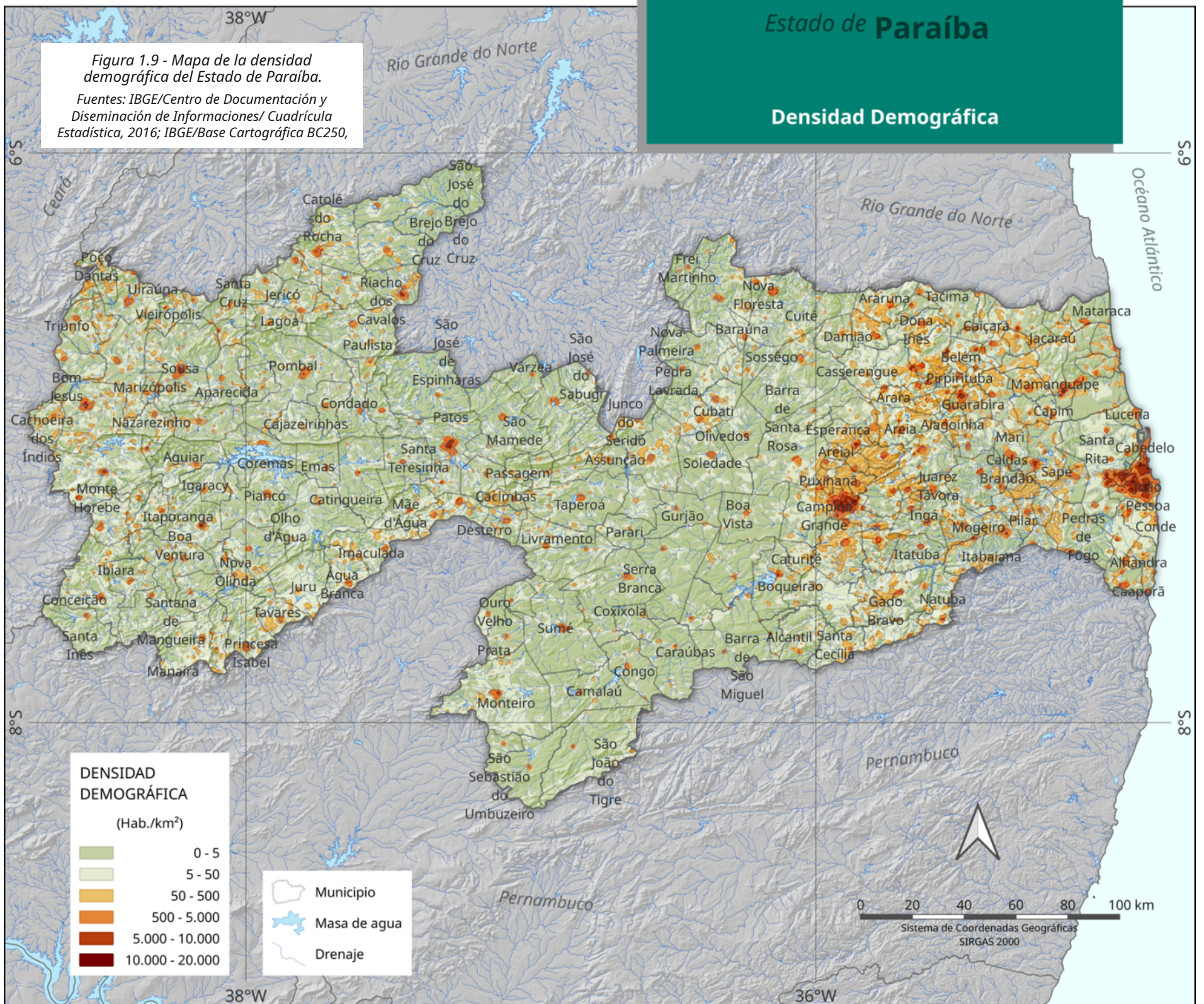


Estado de Paraíba

Densidade Demográfica

Figura 1.9 - Mapa de la densidade demográfica del Estado de Paraíba.

Fuentes: IBGE/Centro de Documentación y Diseminación de Informaciones/ Cuadrícula Estadística, 2016; IBGE/Base Cartográfica BC250,



Los datos de población por sexo y residencia urbana/rural aún no habían sido publicados por el IBGE en el momento de la impresión de este documento (julio/2023). Los valores actualizados se pueden obtener en la página del Censo de 2022, a la que se puede acceder a través de Internet en Censo 2022 (<http://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>).

Aun considerando el Censo de 2022, las ciudades más pobladas de Paraíba son: João Pessoa, capital del estado, con cerca de 834 mil habitantes; Campina Grande, con aproximadamente 420 mil habitantes; Santa Rita, con aproximadamente 150 mil habitantes; Patos, con unos 105 mil habitantes. y Bayeux, con aproximadamente 83 mil habitantes.

Según IPEA (2022), el Índice de Desarrollo Humano (IDH) del Estado de Paraíba avanzó en la última década, de 0,66 en 2010 a 0,72 en 2017.

Economía

Datos de la Secretaría de Planificación, Presupuesto y Gestión del estado de Paraíba indican que el Producto Interno Bruto (PIB) de 2020 fue de R\$ 70,3 mil millones. La **Figura 1.10** muestra la evolución del PIB en Paraíba durante las últimas dos décadas, con un crecimiento de alrededor de 2,1 veces entre 2010 y 2020.

La economía del estado de Paraíba se basa en la producción agrícola, la industria

Tabla 1.2 - Tierras indígenas en el Estado de Paraíba. Las letras (Id) indican la posición en el mapa.

Fuente: FUNAI (Fundación Nacional del Indio), 2021.

Id	Tierra indígena	Área (ha)	Etnia	Municipio
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

Tabla 1.3 - Tierras quilombolas en el Estado de Paraíba. Las letras (Id) indican la posición en el mapa.

Fuente: Ministerio de Agricultura, Pecuaria y Abastecimiento / INCRA (Instituto Nacional de Colonización y Reforma Agraria), 2021.

Id	Tierra Quilombola	Área (ha)	Familias	Municipio
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	Mogero
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

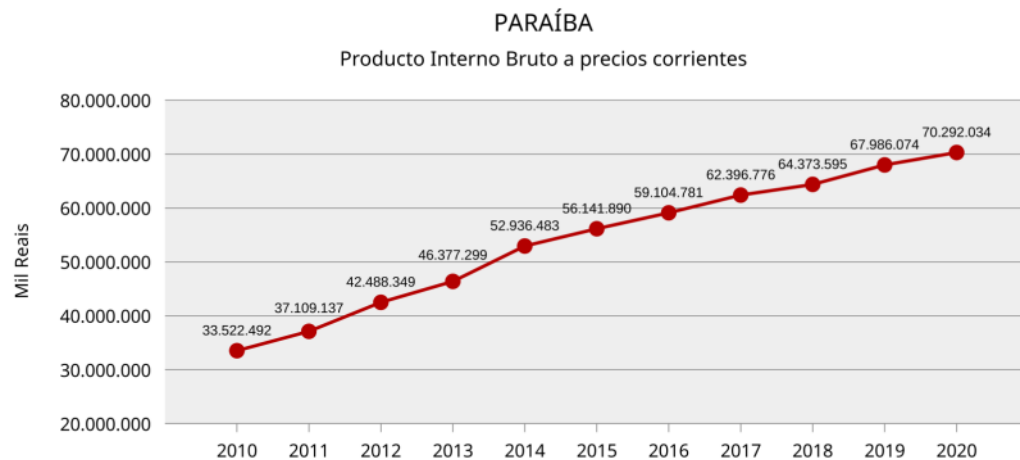


Figura 1.10 - Evolución del Producto Interno Bruto del Estado de Paraíba.

Fuente: IBGE, en colaboración con las Agencias Estatales de Estadística, las Secretarías de Gobierno de los Estados y la Superintendencia de la Zona Franca de Manaus - SUFRAMA.

del cuero y el turismo. Los principales productos agrícolas son: caña de azúcar, piña, yuca, maíz, frijol y algodón herbáceo (IBGE, 2022). El estado tiene un rebaño estimado de 1,3 millones de cabezas de ganado vacuno, que se suman a la cría de cerdos, ovejas y caballos. Además de los artículos de cuero, también se industrializan productos alimenticios y textiles, azúcar y alcohol.

Sistema eléctrico

Según el Sistema de Información de Generación de la ANEEL (SIGA), la capacidad instalada de generación eléctrica en Brasil (potencia supervisada) es aproximadamente 189.871 MW, siendo la solar fotovoltaica responsable del 4,1% de la generación centralizada. Pero si se considera el potencial ya existente en generación distribuida (GD – 17.000 MW), la capacidad instalada en Brasil (centralizada + GD) es de 206.871 MW, siendo la solar fotovoltaica responsable del 11,8% de ese total, lo que la sitúa como la segunda mayor fuente renovable en el país, solo detrás de la fuente hídrica (ANEEL/SIGA, 2023; ANEEL/Generación Distribuida, 2023).

En el estado de Paraíba, se destaca aún más la participación de la energía solar fotovoltaica. La capacidad instalada de generación eléctrica en el estado es de 1.733 MW (potencia supervisada –

generación centralizada), lo que corresponde al 0,9% del país, siendo la solar fotovoltaica responsable del 26,2% (454 MW). Al considerar también la capacidad instalada de generación distribuida, la capacidad instalada total en el estado (potencia supervisada) alcanza los 1.992 MW, siendo la energía solar fotovoltaica responsable del 35,7% de este total, siendo la fuente de energía más importante del estado. (ANEEL/SIGA, 2023; ANEEL/Generación Distribuida, 2023). Al analizar la fuente solar fotovoltaica como generación distribuida, se observa que las instalaciones se concentran principalmente en la clase comercial y residencial, con un 40,9% y 40,8% respectivamente, como se muestra en la [Figura 1.11](#).

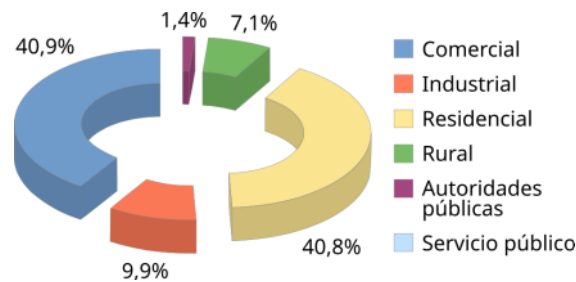


Figura 1.11 - Porcentaje de participación por clase de consumo de fuente solar fotovoltaica en GD.

Fuente: Adaptado de ANEEL/Generación Distribuida, 2023

La [Tabla 1.4](#) presenta la lista de las mayores plantas de generación fotovoltaica en operación en el estado de Paraíba – generación centralizada (ANEEL/SIGA, 2023).

Según el Balance Energético Nacional (BEN, 2022), el estado de Paraíba fue responsable de generar aproximadamente

3.434 GWh en 2021, equivalente al 2,3% del total producido en la región Nordeste y al 0,5% del total producido en Brasil. Las fuentes de energía renovables representan aproximadamente 1.680 GWh (49%) de la matriz eléctrica de Paraíba. Las termoeléctricas participan con 1750 GWh (51%), como se muestra en la [Figura 1.12](#). Solo el sector residencial fue responsable del consumo de 2.346 GWh, o sea, el 68% del total generado en el estado.

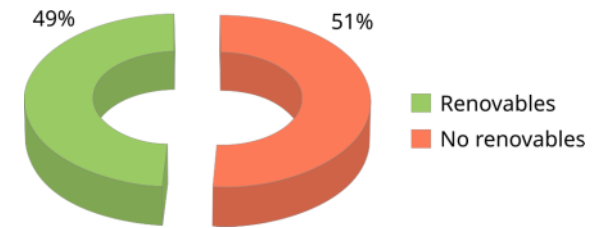


Figura 1.12 - Porcentaje de participación de fuentes renovables en la matriz energética de Paraíba.

Adaptado de ANEEL/BEN, 2022.

El estado de Paraíba está en condiciones de asumir un mayor papel en la generación de electricidad, considerando el potencial disponible de los recursos solares y eólicos.

Con relación al potencial de generación solar fotovoltaica, estudios previos muestran que el estado de Paraíba se encuentra dentro del cinturón solar (Pereira et al., 2017) con altos niveles de radiación solar. Este atlas detalla la distribución espacial y temporal de la radiación solar incidente en la superficie del territorio de Paraíba, demostrando que el estado tiene un enorme potencial de expansión en este sector.

Tabla 1.4 - Principales plantas de generación fotovoltaica en operación en el estado de Paraíba.

Fuente: ANEEL/SIGA, 2023.

Empresa	Potencia concedida (MWp)	Municipio
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

El Atlas de los Vientos del Estado de Paraíba (<https://mapaeolico.pb.gov.br/>) indica que más del 90% de las áreas que presentan velocidades medias anuales de vientos superiores a 7,0 m/s en altitudes de hasta 150 metros de altura están localizadas a menos de 40 km de alguna de las subestaciones en operación en el estado.

La información sobre el sistema eléctrico que atiende al estado de Paraíba fue proporcionada por la Agencia Nacional de Energía Eléctrica (ANEEL) y por la Empresa de Investigación Energética (EPE) y fueron utilizadas para preparar los escenarios de uso del recurso solar que se describen más adelante en este documento.

Según ANEEL y EPE, el sistema de transmisión en el estado de Paraíba consta de líneas de 500 kV y 230 kV. Estas líneas dan servicio al estado como se ilustra en la [Figura 1.13](#).

El sistema de distribución, de acuerdo con la Base de Datos Geográfica de la Distribuidora (BDGD), bajo responsabilidad de la ANEEL, está compuesto principalmente por líneas de 69 kV, actualmente operadas en concesión por la empresa Energisa Paraíba, que atiende a todo el estado, como también se muestra en la [Figura 1.13](#).

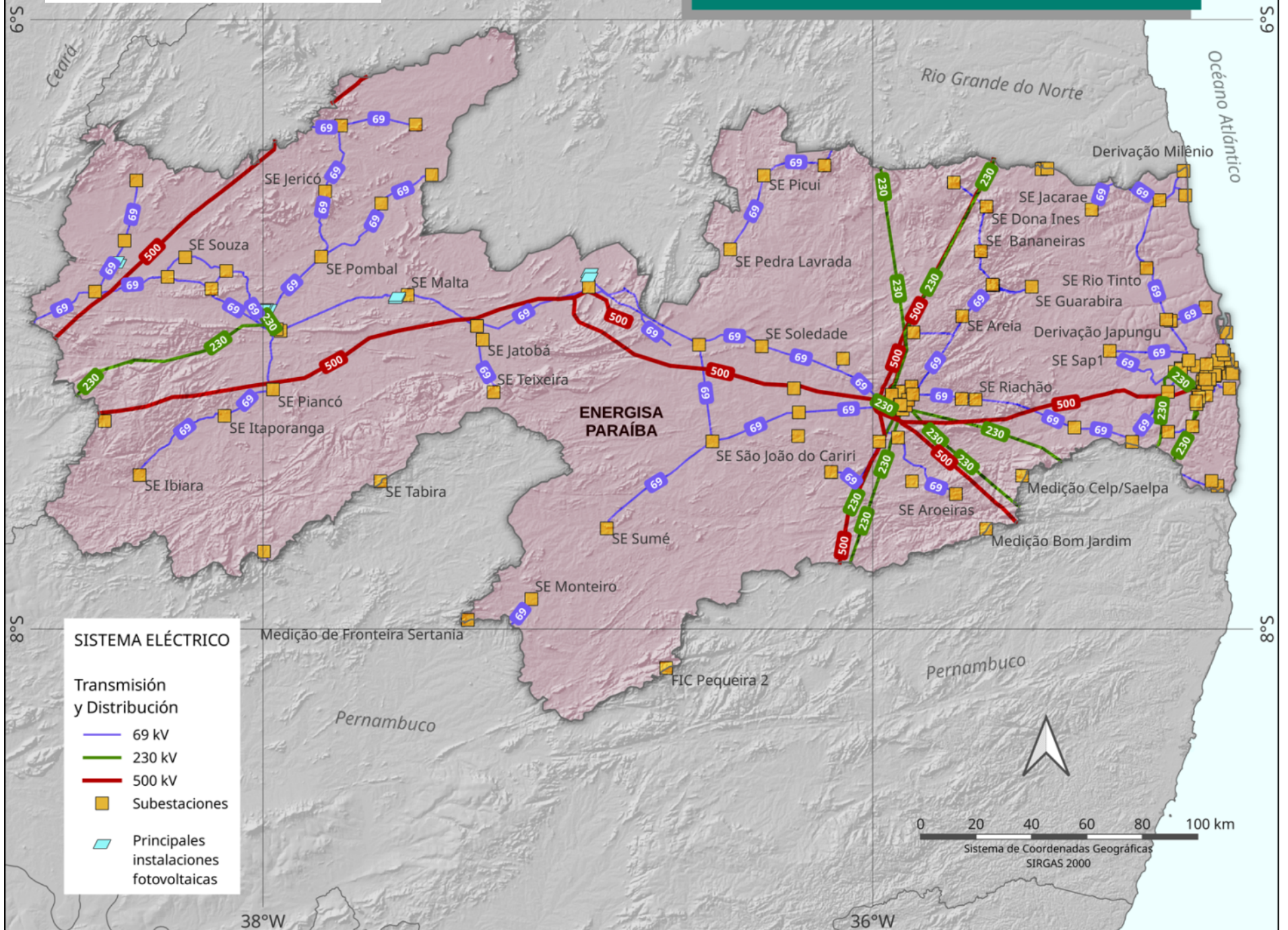
Estado de Paraíba

Sistema Eléctrico

Transmisión y distribución

Figura 1.13 - Sistema eléctrico en el estado de Paraíba incluyendo líneas de transmisión y distribución y plantas de generación.

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



Algunas plantas fotovoltaicas en funcionamiento en Paraíba



Complejo Solar Coremas, inaugurado en septiembre de 2020, en el municipio de Coremas, Paraíba (-6,9564°, -37,9937°). El complejo está formado por ocho centrales solares con una capacidad de generación de 27 MWp (Megavatios-pico) cada una (Coremas I a VIII), incluyendo una subestación y una línea de transmisión.



FUNDAMENTOS DE LA ENERGÍA SOLAR

Conceptos básicos de la irradiación solar

La radiación solar es la fuente de energía utilizada para la generación de electricidad mediante dos tecnologías ya consolidadas en el mercado: la generación fotovoltaica y la generación helio-térmica. La energía solar también tiene aplicaciones en la producción de calor y puede satisfacer demandas de la producción agrícola e a pecuaria, de procesos industriales y de sistemas de calentamiento de agua para los hogares.

La energía solar es el resultado de la fusión nuclear de los átomos de Hidrógeno, que representan alrededor del 75% de la composición del Sol, aconteciendo a una velocidad que ha permanecido aproximadamente constante durante miles de millones de años y con una potencia instantánea del orden de $3,86 \times 10^{26}$ W. Apenas una fracción de la energía emitida por el Sol llega al tope de la atmósfera de nuestro planeta Tierra. La

cantidad de energía que llega al límite superior, o tope, de la atmósfera terrestre se mide desde principios de los años 1970 mediante diferentes técnicas e instrumentos y se conoce como Constante Solar. La Sociedad Americana de Ensayos y Materiales estableció el valor de $1366,1 \pm 2,5$ W/m², denominado ASTM E490-00a (ASTM, 2019), como el estándar para dicha cantidad más reconocido a nivel mundial.

Entre los diversos factores que influyen en la cantidad y variabilidad de la energía solar que incide en nuestro planeta, los más importantes son el movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol, en una órbita elíptica que dura 365 días, 5 horas, 48 minutos y 48 segundos, y el movimiento de rotación alrededor de un eje polar con una inclinación de 23,45° con relación al plano de la órbita solar, que define el ciclo diario. Estos dos movimientos combinados definen los ciclos diarios (día/noche) y

estacionales asociados con las estaciones: verano, otoño, invierno y primavera. La [Figura 2.1](#) ilustra estos dos movimientos principales y sus efemérides.

Los componentes atmosféricos (gases y partículas presentes en la atmósfera) también juegan un papel importante en la atenuación de la radiación solar debido a procesos de interacción como la absorción y dispersión de la radiación solar. Estos procesos radiativos en la atmósfera también determinan la disponibilidad y variabilidad de la incidencia de la energía solar en la



Figura 2.1 - Movimiento de la Tierra alrededor del Sol, con referencia a las fechas de las efemérides relevantes para el hemisferio sur.

Fuente: Martins y Pereira, 2019.

superficie utilizada para la generación de electricidad y otros fines.

Para comprender los ciclos diarios y estacionales de la radiación solar que incide en la superficie es necesario comprender una serie de conceptos establecidos en función de la posición relativa entre el Sol y la Tierra. Los principales ángulos notables se ilustran en la [Figura 2.2](#) y son: ángulo cenital (θ_z), altitud o elevación (α), ángulo de azimut solar (γ_s). La declinación solar (δ), ilustrada en la [Figura 2.3](#), es el ángulo entre una línea imaginaria que une los centros del Sol y la Tierra y el plano ecuatorial de la Tierra.

Un concepto muy importante es el de foto-periodo, que corresponde al intervalo de tiempo que tarda el Sol en recorrer el cielo, desde la salida hasta la puesta del sol. Del mismo son derivados los conceptos de crepúsculo (amanecer/atardecer), tal y como definidos en la norma ABTN (NBR- 5123), que establece normas para el alumbrado público.

Componentes de la irradiación solar

La atmósfera terrestre actúa sobre el espectro de la radiación solar incidente mediante los fenómenos de dispersión y absorción selectiva en determinadas longitudes de onda. La dispersión ocurre cuando

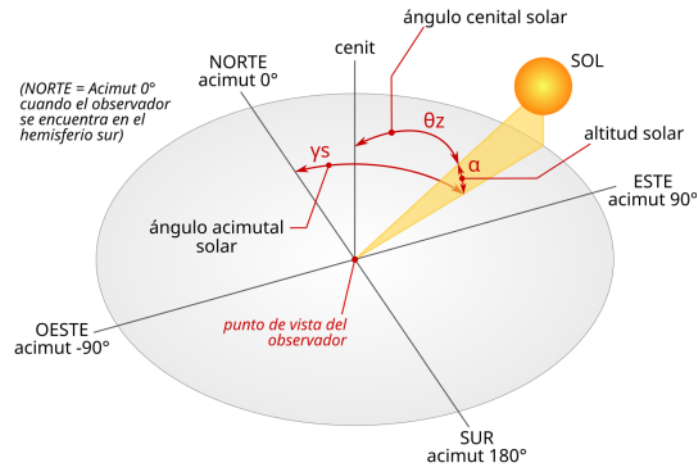


Figura 2.2 - Representación gráfica de los principales ángulos que definen la posición del Sol en la bóveda celeste.

Fuente: Martins y Pereira, Energía solar: estimación y previsión del potencial solar: Appris, 2019.

una fracción del haz de radiación proveniente del Sol es removida del flujo en la dirección de incidencia e irradiada nuevamente, pero en longitudes de onda más largas y en direcciones aleatorias. El proceso de dispersión depende de la relación entre el tamaño del elemento dispersor y la longitud de onda de la radiación dispersada. La dispersión causada por los gases atmosféricos se describe como dispersión de Rayleigh, mientras que la dispersión causada por partículas suspendidas en la atmósfera (aerosoles) y gotas de agua presentes en las nubes se describe mediante la teoría de dispersión de Mie (Yamasoe y Corrêa, 2016).

La absorción selectiva de longitudes de ondas específicas de la radiación solar ocurre debido a fenómenos cuánticos de interacción

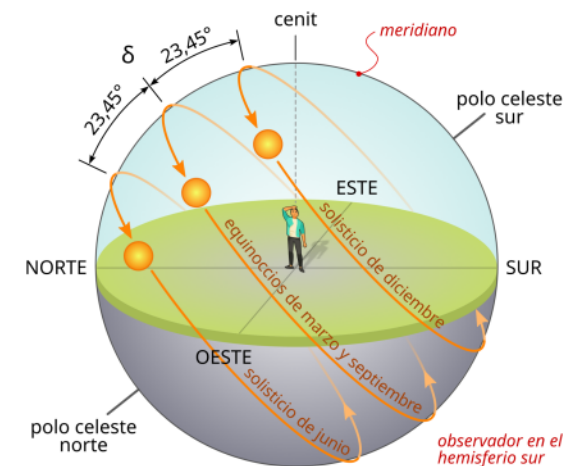


Figura 2.3 - Ilustración del ángulo de declinación (δ), que varía de 23,45° norte a 23,45° sur.

Fuente: Martins y Pereira, 2019.

de la radiación con la materia. Los componentes atmosféricos que más contribuyen con la absorción de la radiación solar por la atmósfera son el ozono (O_3), para radiación en la región ultravioleta del espectro; y el vapor de agua y el gas carbónico (CO_2), para radiación en las regiones visible e infrarrojo próximo. Como resultado de estas interacciones de la radiación solar con la atmósfera, el espectro solar resultante que llega a la superficie es fuertemente alterado, como ilustrado en la [Figura 2.4](#).

La **irradiancia solar** se define como el flujo instantáneo de energía radiante que incide sobre una superficie por unidad de área, siendo expresada en W/m^2 . (Watt por metro cuadrado). Entretanto, la **irradiación solar** se obtiene integrando la irradiancia solar durante un dado intervalo de tiempo. Su unidad de medida en el

Sistema Internacional (SI) es J/m^2 (Joule por metro cuadrado). Sin embargo, el sector de generación de energía usualmente adopta la unidad Wh/m^2 (Watt-hora por metro cuadrado) para expresar la irradiación solar. Esta es una magnitud muy utilizada en el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos.

La irradiancia solar se clasifica en sus componentes Global, Directa y Difusa según los procesos de dispersión radiativa en la atmósfera. La irradiancia solar también se puede clasificar considerando la geometría y ubicación de la superficie sobre la que se produce la incidencia como: Plano Inclinado, Plano Horizontal y Extraterrestre. Con base en estas clasificaciones, se presentan a continuación las definiciones adoptadas en el presente Atlas de Energía Solar del estado de Paraíba:

- **Irradiancia extraterrestre (G_0):** es el flujo instantáneo de energía solar incidente

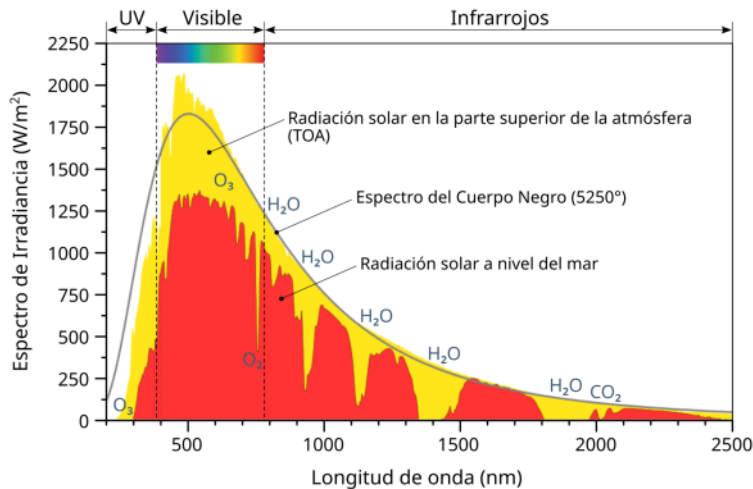


Figura 2.4 - Espectro de la radiación solar incidente en el tope de la atmósfera y en la superficie terrestre. Las bandas de absorción y la región correspondiente a la radiación visible son ilustradas.

sobre un plano horizontal imaginario situado en el tope de la atmósfera. También se conoce como irradiancia de la atmósfera superior o TOA (del inglés top of atmosphere);

- **Irradiancia difusa (G_{dif} ou DHI):** es el flujo instantáneo de energía solar que incide sobre una superficie horizontal, como resultado de la dispersión del haz solar directo por los constituyentes atmosféricos (moléculas, partículas de aerosoles, gotas de agua en las nubes, etc.);
- **Irradiancia directa normal (G_n ou DNI):** proveniente directamente del Sol que incide sobre una superficie en dirección normal, o sea, perpendicular, al haz de irradiación solar, sin sufrir dispersión alguna durante su recorrido en la atmósfera;
- **Irradiancia directa (G_{dir}):** es la porción de irradiancia solar directa (G_n) que incide

perpendicularmente a una superficie horizontal, siendo determinada como el producto entre la irradiancia solar directa normal (G_n) y el coseno del ángulo cenital solar;

• **Irradiancia global horizontal (G ou GHI):** es el flujo instantáneo de energía solar incidente sobre una superficie horizontal, consistente en la suma de las componentes directa y difusa de la irradiancia solar, es decir, $G = G_{dif} + G_{dir}$ o también: $G = G_{dif} + G_n \cdot \cos(\theta_z)$;

• **Irradiancia global en el plano inclinado (G_{Ti}):** es el

flujo instantáneo de energía solar por unidad de área, incidente en un plano inclinado con respecto a la superficie terrestre. En general, esta nomenclatura se adopta para describir la irradiancia solar en un plano con un ángulo de inclinación con respecto al plano horizontal, y orientado hacia el Norte (o Sur) geográfico en el Hemisferio Sur (o Norte).

Los componentes de la irradiancia solar pueden verse en la Figura 2.5.

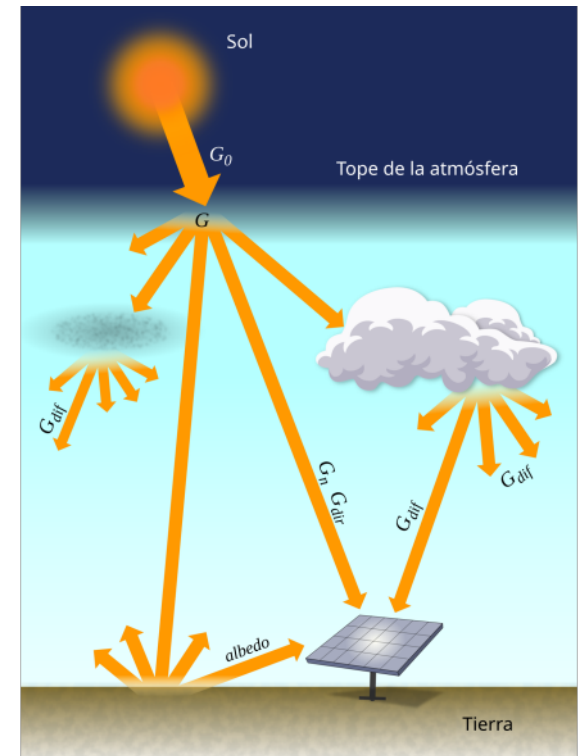


Figura 2.5 Componentes de la radiación solar incidente sobre un colector solar en un plano inclinado.

Fuente: Atlas Brasileño de Energía Solar - INPE, 2017.

Medición de la radiación solar

Para medir la energía solar incidente en la superficie se utilizan varios métodos basados en diferentes procesos físicos, como se muestra en la [Tabla 2.1](#). Los sensores

modernos, utilizados para adquirir datos de radiación solar, evalúan el parámetro físico medido mediante una señal eléctrica y se denominan genéricamente radiómetros. Las normas ISO y OMM establecen clasificaciones y especificaciones para medir la irradiancia solar (ISO 1990; OMM 2008).

Los piranómetros son instrumentos más modernos y de uso generalizado para mediciones de irradiancia solar global (GHI). Este equipo suele utilizar dos tipos de

sensores: el sensor de termopila (conjunto de termopares) o el sensor de fotodiodo.

En general, los equipos se dividen en tres clases distintas:

- alta calidad (también denominados estándares secundarios);
- buena calidad (instrumentos de primera clase);
- calidad moderada (instrumentos de segunda clase).

Los piranómetros de termopila tienen una curva de respuesta espectral prácticamente plana entre 300 y 3000 nm (rango espectral que comprende la radiación visible y parte de las regiones de radiación ultravioleta e infrarroja), cubriendo todo el espectro de radiación solar de interés, como se muestra en la [Figura 2.6](#). Actualmente, el piranómetro de termopila es el sistema más preciso (de primera clase) para medir la radiación solar, ya que la curva de respuesta de los sensores de fotodiodos tiene una gran dependencia espectral y cubre apenas parcialmente el espectro de la radiación solar que incide sobre la superficie terrestre.

La adquisición de datos de irradiancia solar directa normal se puede realizar de dos maneras. La metodología directa utiliza un pirheliómetro con elemento sensor de termopila, el cual debe acoplarse a un sistema robótico de seguimiento del disco solar, como se muestra en la [Figura 2.7 \(a\)](#), para mantener el sensor siempre iluminado por la radiación solar durante todo el día.

Tabla 2.1 - Principales procesos físicos en los que se basan las observaciones de la radiación solar.

Categoría	Proceso de medición	Sensores	Imagen
Indirecto	Duración de la luz solar (insolación)	Heliógrafo	
Mecánico	Bimetal	Actinógrafo	
Térmico	Transformación de energía radiante de onda corta en onda larga (termopila)	Pirómetro Pirheliómetro Pirgeómetro	
Eléctrico	Efecto fotoeléctrico	Luxímetro Fotodiodo Medidor Quantum	
Óptico	Conversión de radiación UV a través de elementos fluorescentes	Radiómetro GUV	
Molecular	Reacción química en emulsiones	Filme fotográfico	

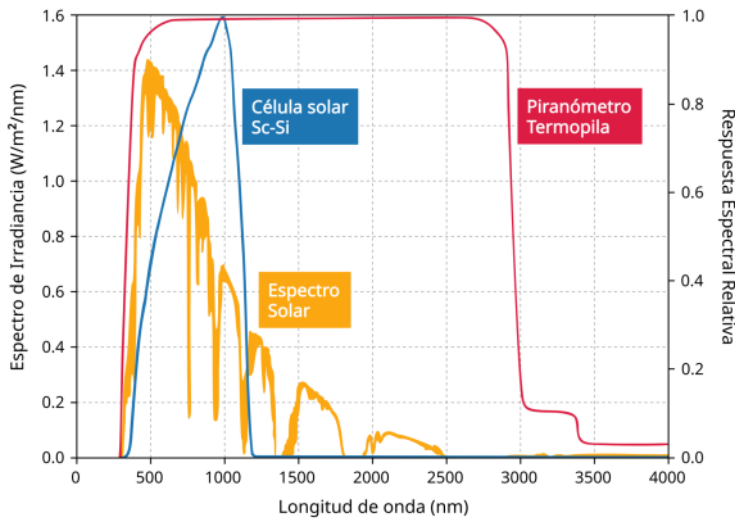


Figura 2.6 - Respuestas espectrales relativas de una célula solar sc-Si y un piranómetro de termopila.

Fuente: Neves, 2021.

La metodología indirecta utiliza un par de piranómetros, uno de los cuales debe estar constantemente sombreado mediante un anillo (o esfera acompañada de un seguidor solar) para medir la componente difusa (DHI) de la irradiancia solar, como se ilustra en la Figura 2.7 (b). La irradiancia solar directa (Gdir) se obtiene mediante simple resta entre la radiación global horizontal (GHI) y la componente difusa horizontal de la radiación solar (DHI), y posterior corrección por el ángulo cenital solar.

Las mediciones de la irradiancia solar en campo son realizadas mediante estaciones solarimétricas con diversas configuraciones. Sin embargo, a los efectos de la obtención de datos para proyectos de generación solar, las mediciones de los distintos componentes de la radiación solar incidente siempre van acompañadas de mediciones

de variables meteorológicas como la temperatura ambiente y la velocidad del viento, con una frecuencia de adquisición igual a la adoptada para la irradiancia solar mediada.

Básicamente, existen dos tipos principales de estaciones solarimétricas: las destinadas a estudios, investigación, desarrollo y calibración de modelos computacionales de levantamientos solarimétricos y las estaciones automáticas que cumplen con los requisitos establecidos por la EPE (EPE-DEE-RE-065/2013) para su registro y calificación técnica, con el objetivo de proveer datos que

serán utilizados en las subastas de energía. Según el reglamento de la EPE, la estación solarimétrica debe contar, como mínimo, con los siguientes instrumentos:

- dos piranómetros sin selectividad espectral (instrumentos de segunda clase) o mejores, según la norma ISO 9060:1990, para la medición de la irradianción horizontal global;
- un anemómetro (para medir la velocidad del viento);
- un higrómetro (para medir la humedad relativa del aire);
- un termómetro (para medir la temperatura del aire).

Además de los piranómetros para medir la componente global de la radiación, las estaciones dedicadas a estudios y al

desarrollo de modelos utilizan pirheliómetros acoplados a un rastreador solar para obtener la componente directa de la radiación solar incidente, y otros instrumentos de medición diversos, como cámaras fotográficas para registrar imágenes del cielo (para estudios de nubosidad),

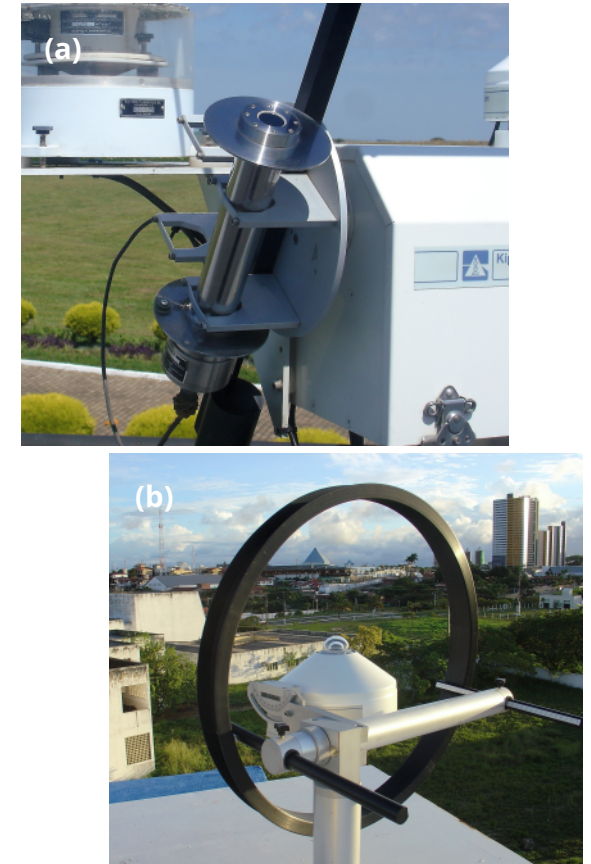


Figura 2.7 - Ejemplos de procesos de medición de la radiación solar directa, (a) usando el pirheliómetro e (b) utilizando el par de piranómetros, uno de los cuales está equipado con un anillo de sombreado (el segundo piranómetro no aparece en la imagen).

espectrofotómetros (para estudiar el espectro de la radiación solar), fotómetros solares, para estudiar la composición de la atmósfera (aerosoles, vapor de agua), entre otros. La **Figura 2.8** ilustra estos dos tipos de estaciones solarimétricas.

Las incertidumbres de las mediciones radiómetros resultan de la calidad de las instalaciones, los equipos, la ubicación de la instalación y las incertidumbres que surgen de su operación en el campo. La **Tabela 2.2** presenta, de manera cualitativa, la importancia relativa de las diferentes etapas de instalación, operación y mantenimiento de una estación solarimétrica. Para efectos de aumentar los recursos de energía solar para la generación de energía eléctrica, solo se deben utilizar instrumentos de “primera

clase” o “estándares secundarios” si el proyecto cuenta con suficientes recursos financieros a largo plazo para respaldar la operación y el mantenimiento necesarios para garantizar la calidad de las mediciones.

Generación de electricidad a partir de energía solar

Para convertir la energía solar en electricidad se utilizan dos tecnologías: la conversión fotovoltaica (o generación fotovoltaica) y la conversión térmica (o generación helio-térmica). La primera se

basa en el principio físico conocido como efecto fotovoltaico, que es la producción de una corriente eléctrica en un material semiconductor expuesto a radiación elec-

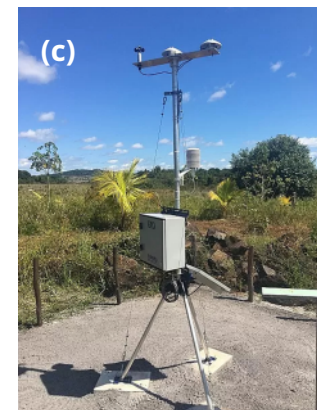


Figura 2.8 – Plataformas solarimétricas de recopilación de datos (a, b) plataforma destinada a investigación, (c) plataforma atendida a los requisitos de la EPE (2021).

Incertidumbres

La exactitud de un radiómetro indica qué tan cerca están las mediciones observadas del valor de referencia y está relacionada con desviaciones sistemáticas, generalmente atribuidas a problemas de calibración. Por otro lado, la incertidumbre o precisión está relacionada con la dispersión de las mediciones en relación con cualquier valor promedio, relacionada con varios factores instrumentales, o con etapas de obtención de datos como mantenimiento, presencia de suciedad en el domo, inestabilidad estructural de la plataforma de donde está instalado el instrumento, etc. La imagen de al lado ilustra el concepto de exactitud y precisión en términos estadísticos. El centro del objetivo representa el valor de referencia de la variable evaluada. Los puntos representan los valores observados para una misma variable (Fuente: Martins y Pereira, 2019).

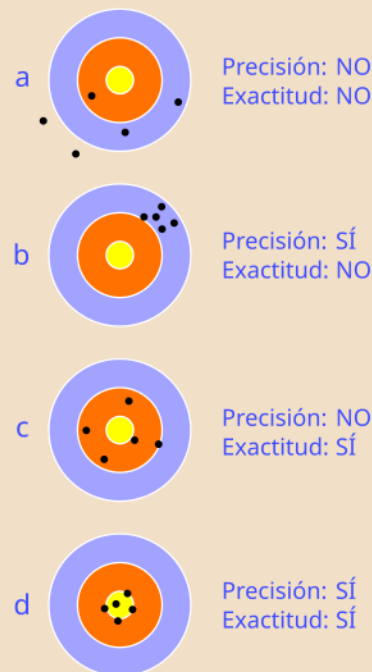


Tabla 2.2 - Importancia relativa, de forma cualitativa, de las distintas etapas de instalación, operación y mantenimiento de una estación solarimétrica.

Pasos	Importancia Relativa		
	Mayor	Media	Menor
Operación y mantenimiento	Mayor		
Control de calidad	Mayor		
Generación y almacenamiento de metadatos		Media	
Selección de sensores		Media	
Método de instalación		Media	
Elección del emplazamiento		Media	
Frecuencia de muestreo		Media	
Período de campaña		Media	
Calibración del sensor			Menor
Adquisición de datos			Menor

tromagnética, como las células de silicio presentes en los módulos fotovoltaicos.

La conversión depende del material semiconductor utilizado, que se caracteriza por la energía de creación de pares de electrones libres y huecos (energía de banda prohibida). Así, la elección de la tecnología para la producción de módulos fotovoltaicos (silicio mono o policristalino, películas delgadas o semiconductores orgánicos) está asociada a la respuesta espectral y también al espectro solar incidente. La [Figura 2.9](#) ilustra el efecto fotovoltaico en una celda semiconductor que compone un panel fotovoltaico. La eficiencia de conversión de la radiación solar en electricidad de las tecnologías disponibles en el mercado es del orden del 18 al 24%

La generación fotovoltaica utiliza la irradiación global incidente, es decir, las

componentes directa y difusa de la radiación solar, incluida la componente que proviene del albedo superficial, por lo que se produce incluso en días nublados, aunque con menor productividad.

La temperatura de funcionamiento de la célula semiconductor también influye en la generación fotovoltaica. El aumento de temperatura provoca la reducción de la eficiencia de conversión fotovoltaica. De ahí la importancia de los datos de temperatura del lugar de instalación previsto, ya que influyen en la temperatura de funcionamiento del módulo fotovoltaico.

La generación termosolar o helio-térmica (CSP - *Concentrated Solar Power*) utiliza espejos (helióstatos) que reflejan la luz solar con el fin de concentrar la incidencia solar para la conversión térmica. El calor calienta un fluido de trabajo que moverá las

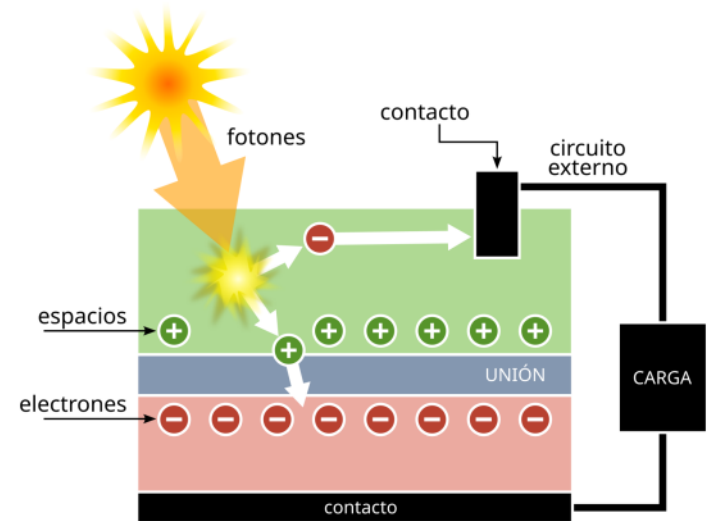


Figura 2.9 - Ilustración del efecto fotovoltaico en una célula fotovoltaica.

Fuente: Neves, 2021.

turbinas y activará el generador de electricidad. Existen varias tipologías de generación solar térmica, utilizando espejos parabólicos lineales, o sistemas de varios espejos planos dispuestos de manera que generan calor en un único punto. La [Figura 2.10](#) ilustra las principales tipologías de generación termosolar más utilizadas. La generación solar térmica utiliza únicamente la componente directa de la radiación solar incidente y, por tanto, solo puede aplicarse en regiones con poca nubosidad y alta incidencia de radiación solar, como, por ejemplo, en regiones áridas. Sin embargo, tiene la ventaja de poder generar electricidad incluso después del atardecer, siempre que cuente con sistemas de almacenamiento del calor generado durante el día.

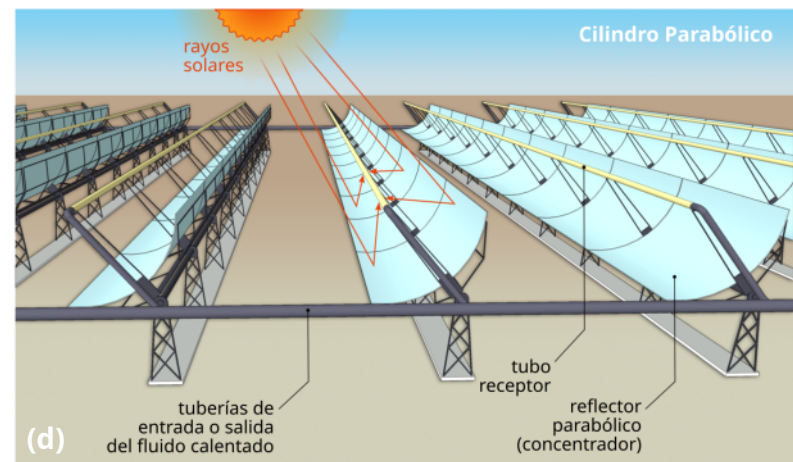
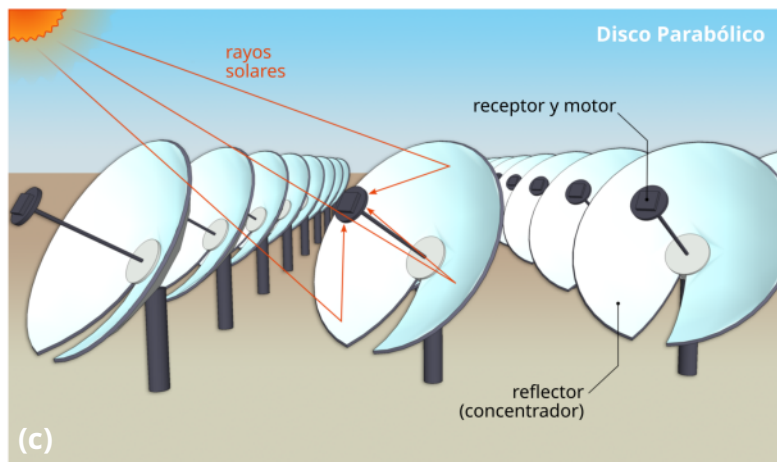
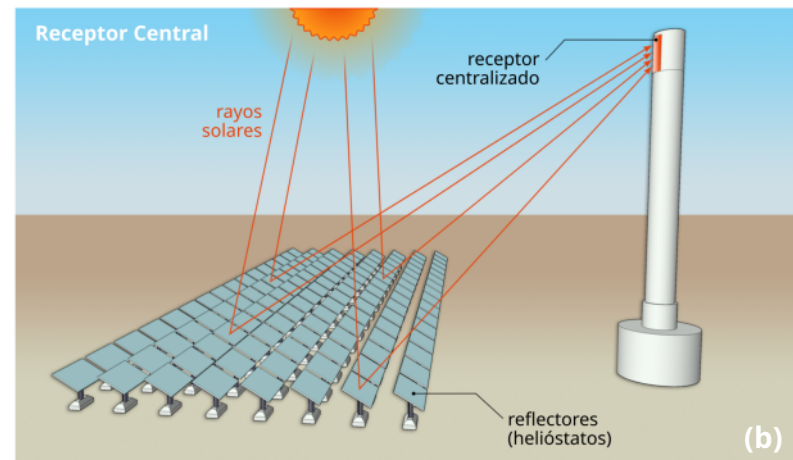
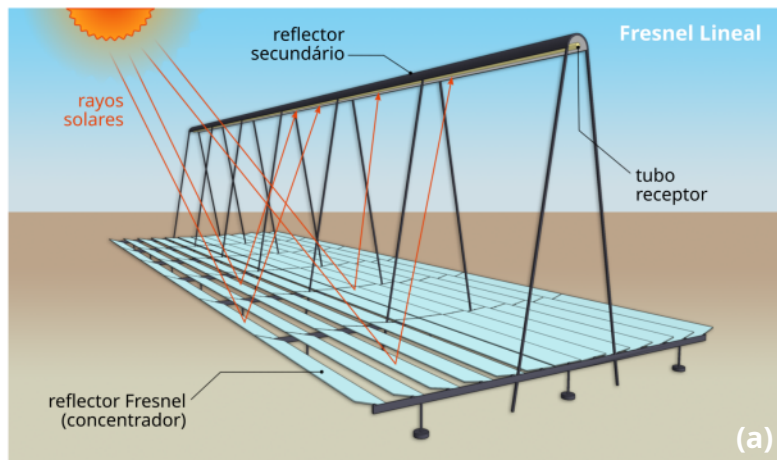


Figura 2.10 - Sistema de generación helio-térmica: (a) mediante tecnología de lentes Fresnel (b) empleando un sistema de torre; (c) utilizando un disco parabólico; (d) empleando un cilindro parabólico.



METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DEL ATLAS

La elaboración del Atlas de Energía Solar para el Estado de Paraíba adoptó una metodología innovadora que combina el uso de datos climáticos y sensores remotos con un modelo numérico de transferencia radiativa adaptado a las condiciones ambientales encontradas en el territorio nacional (Martins y Pereira, 2006; Martins et al., 2008; Costa et al., 2016; Pereira et al., 2017). Como resultado de investigaciones realizadas durante las últimas décadas, el modelo de transferencia radiativa BRASIL-SR, utilizado en la elaboración de este Atlas, utiliza propiedades físicas de la atmósfera y sus constituyentes (temperatura del aire, humedad relativa, espesor óptico de aerosoles, concentración de gases atmosféricos, nubosidad) para estimar el perfil vertical de los principales gases y partículas presentes en la atmósfera basándose en técnicas consolidadas en la literatura científica. Los datos relacionados con la cobertura y el uso del suelo (albedo y altitud) también son esenciales para simular los procesos físicos de atenuación de la radiación solar y obtener la irradiancia solar incidente en la superficie y reflejada de

regreso a la atmósfera (Casagrande et al., 2021). La información sobre la nubosidad presente en la atmósfera, principal factor modulador de la incidencia de la radiación solar en la superficie, se obtiene a partir de imágenes de satélites geoestacionarios de la familia GOES.

Los valores de irradiancia solar incidente en la superficie proporcionados por el modelo BRASIL-SR para cada imagen de satélite fueron integrados numéricamente para determinar los totales diarios para un período de 10 años a partir de 2012. Las incertidumbres asociadas a la metodología fueron evaluadas mediante métodos estadísticos. Métricas, como el bias, el error cuadrático medio y la correlación de Pearson, y determinadas a partir de la comparación entre los valores estimados y observados en estaciones de medición de superficie.

El banco de datos disponibles en este Atlas incluye además los promedios anuales y mensuales del total diario de los siguientes componentes de la irradiación solar incidente en la superficie:

- Total diario de irradiación solar global incidente en el plano horizontal (GHI);

- Total diario de irradiación solar global incidente en el plano inclinado 10° con relación al plano horizontal (GTI_{10});
- Total diario de irradiación solar difusa incidente en el plano horizontal (DHI);
- Total diario de irradiación solar directa normal (DNI), es decir, incidente sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación del haz de energía solar.

Descripción del modelo BRASIL-SR

Los valores de irradiación solar producidos por el modelo BRASIL-SR son adoptados como referencia para el territorio brasileño por instituciones gubernamentales y empresarios del sector energético (CRESESB, 2022; SOLERGO, 2022).

El flujo de operaciones del modelo se puede ver en la [Figura 3.1](#). El modelo espectral BRASIL-SR utiliza 37 intervalos

espectrales distribuidos entre las longitudes de onda de 200 nm y 3700 nm. Los datos espectrales solares en la parte superior de la atmósfera (TOA) corresponden a Gueymard (2004).

Los perfiles atmosféricos verticales de la temperatura del aire, la presión atmosférica y la concentración de gas siguen a

Anderson et al. (1986), y están disponibles para cinco atmósferas estándar seleccionadas en función de la temperatura de la superficie. El coeficiente de absorción de la radiación solar por los gases vapor de agua, O₃, CO₂, O₂ se calcula con base en los métodos propuestos por Wiscombe (1977), Schreier (2019) y Gordon (2017).

La condición de frontera en la superficie se establece basándose en el albedo espectral superficial para radiación directa y difusa. La información de albedo se determinó como lo describen Schaaf et al. (2002), utilizando los parámetros del kernel BRDF derivados para el sensor MODIS en los satélites ACQUA y TERRA. Los parámetros del kernel BRDF son interpolados linealmente para las 37 longitudes de onda espectrales utilizadas por el modelo.

La base de datos de profundidad óptica de aerosoles atmosféricos para la longitud de onda de 550 nm se interpola para las 36 longitudes de onda restantes de rangos espectrales utilizando el exponente de Angström como parámetro de entrada (Casagrande et al., 2021). A la vez, también se distribuye verticalmente en cada columna de la cuadrícula, entre la superficie y la altura de 5 km, suponiendo una profundidad óptica fija de 0,0216 para alturas entre 5 km y 50 km. Por debajo de los 5 km de altura, se presupone una caída exponencial de la profundidad óptica con la altitud. La selección de las otras propiedades ópticas del aerosol en la columna (albedo de dispersión simple y factor de asimetría) se basa en el bioma

predominante para cada celda de la cuadrícula, como se describe en (Darbyshire et al., 2018).

El modelo BRASIL-SR supone que las nubes están distribuidas en dos capas atmosféricas en el perfil vertical de la atmósfera. Las propiedades ópticas de las nubes estrato-cúmulos se utilizaron en la creación del Atlas. La metodología supone que bajo un cielo completamente nublado no hay incidencia de irradiación directa en la superficie.

Datos de entrada

El modelo de transferencia radiativa BRASIL-SR requiere un conjunto de datos meteorológicos y ambientales para la parametrización numérica de los procesos radiativos en la atmósfera. Esta sección describe brevemente las principales características de las bases de datos utilizadas y el procesamiento necesario para la organización y formato requerido para automatizar el procedimiento de lectura de datos y la ejecución del modelo. Este procedimiento generó la composición de los 10 años de cálculo de la irradiación solar incidente en la superficie que integran el Atlas de Energía Solar del Estado de Paraíba. Todas las bases de datos utilizadas fueron producidas por instituciones de reconocida competencia académica y ampliamente utilizadas en varias áreas de las actividades humanas, incluidas la agroindustria y la energía (Casagrande et al., 2021).

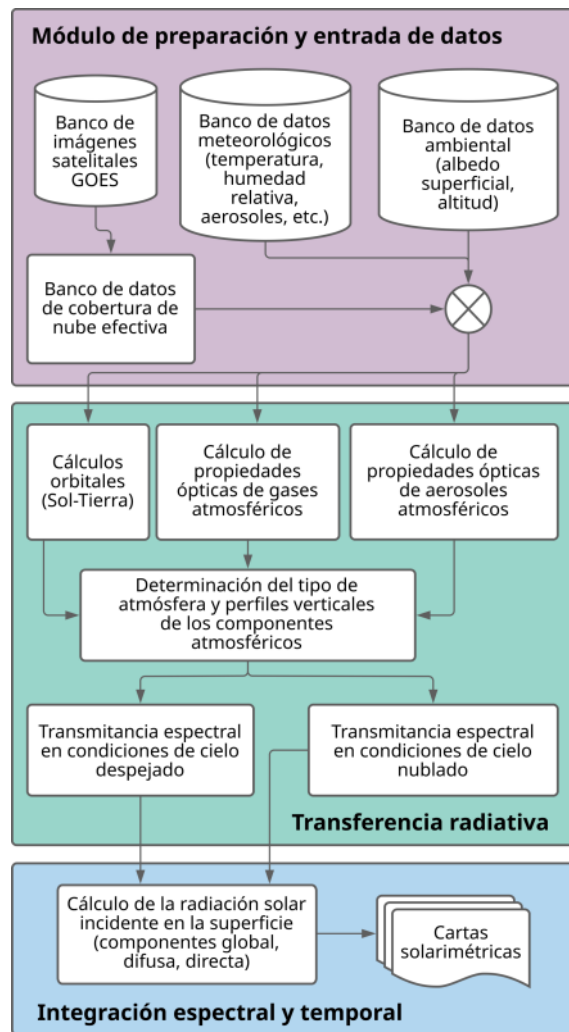


Figura 3.1 - Diagrama de bloques de la metodología utilizada en el Atlas Solarimétrico da

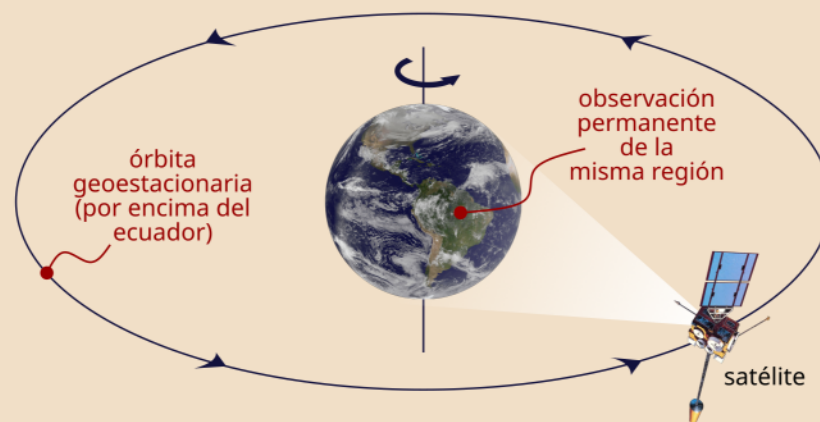
Nubosidad

La nubosidad es el principal factor de atenuación de la radiación solar incidente en la superficie. Así, proporcionar información de calidad al modelo BRASIL-SR sobre la nubosidad presente en un lugar es fundamental para obtener estimaciones confiables y representativas de los valores observados en la superficie (estimaciones con baja incertidumbre). Datos de calidad sobre nubosidad en zonas de gran extensión territorial pueden ser obtenidos a partir del análisis de imágenes en el rango espectral visible obtenidas por satélites geoestacionarios. El índice de nubosidad efectiva adimensional (C_{eff}) para cada píxel (elemento de imagen digital) se determina a partir de la ecuación

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

donde L representa el valor de radiancia observado por el satélite para un píxel específico de la imagen. L_{clear} e L_{cloudy} representan los valores de radiancia observados por el satélite para el mismo píxel cuando se encuentra en la condición de cielo despejado y cielo totalmente cubierto por nubes, respectivamente. Los valores de L_{clear} e L_{cloudy} se determinan a partir del análisis estadístico de imágenes de satélite obtenidas en situaciones similares de geometría de iluminación de píxeles por el Sol, es decir, aproximadamente el mismo ángulo cenital solar.

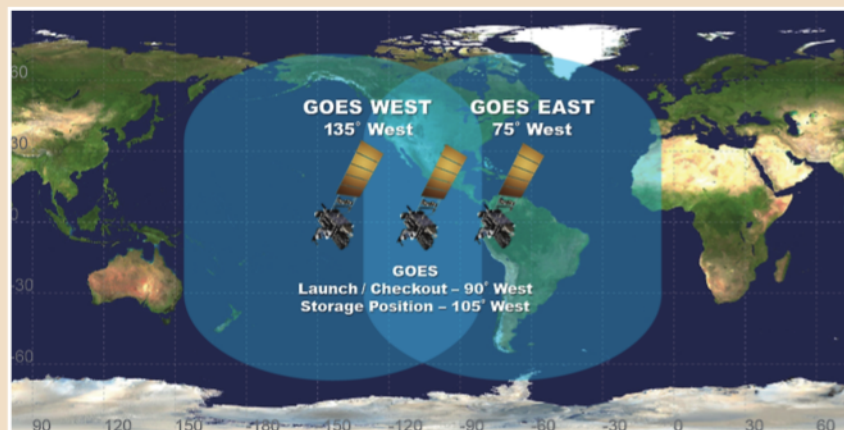
Satélites geoestacionarios



Los satélites geoestacionarios se utilizan para proporcionar un servicio continuo de observación de la Tierra en una zona extensa. La familia de satélites GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) tiene una órbita geosíncrona en el plano ecuatorial y con el mismo periodo orbital que el periodo de rotación del planeta. La órbita geoestacionaria es un tipo de órbita geosíncrona con una característica adicional: permanece estacionaria con respecto a un único punto de la superficie del planeta. Los satélites se sitúan a unos 36.000 km por encima de la superficie terrestre.

NOAA/NASA (*National Oceanic and Atmospheric Administration / National Aeronautics and Space Administration*) opera la familia de satélites GOES, que tienen la mejor geometría para observar el territorio brasileño, ya que permanecen posicionados sobre el ecuador en el meridiano 75° Oeste.

La figura a continuación ilustra las áreas de cobertura de los satélites geoestacionarios GOES sobre las Américas.



El índice de nubosidad efectiva se determinó con base en las imágenes del satélite geostacionario GOES 13 (ya fuera de servicio), para el período comprendido entre 2012 y 2017, y del GOES 16, para el período restante entre 2018 y 2021. Las imágenes en el canal visible (longitud de onda 0,64 μm) del satélite GOES 13 tienen una resolución espacial de 4 km. Su resolución temporal (intervalo de adquisición de cada imagen) fue de 30 minutos.

El satélite GOES 16 reemplazó al GOES 13 y es el primero de la nueva generación de satélites de la familia, con mejoras en la resolución espacial y temporal de los datos disponibles gracias al generador de imágenes ABI. Para crear el Atlas se utilizaron imágenes del canal visible (longitud de onda de 0,64 μm) con una resolución espacial de 1,0 km y una resolución temporal de 10 minutos. La **Tabla 3.1** resume las especificaciones técnicas de los dos satélites. La **Figura 3.2** ilustra imágenes del canal visible obtenidas por los satélites GOES 13 y 16.

Temperatura, humedad relativa y agua precipitable

El modelo BRASIL-SR utiliza los valores de temperatura del aire y humedad relativa para establecer los perfiles verticales de los constituyentes atmosféricos. Los valores de temperatura del aire son fundamentales para establecer los perfiles verticales de los gases constituyentes de la atmósfera (Martins, 2001). Por otro lado, el agua

precipitable es una variable que interactúa fuertemente con la radiación solar y juega un papel importante en atenuar la radiación solar incidente en la superficie, y sus datos se utilizan para corregir el perfil del vapor de agua en la columna atmosférica. Para elaborar el Atlas, los datos de las tres variables disponibles en la base de reanálisis ERA-5 también fueron interpolados con base en el método del píxel vecino más cercano para la resolución espacial de las imágenes satelitales GOES. El reanálisis

ERA-5 está disponible en la página del Servicio de Cambio Climático de Copernicus (<https://climate.copernicus.eu/>).

Ozono

El ozono es el constituyente atmosférico responsable por la mayor parte de la atenuación de la radiación solar en el rango espectral ultravioleta. La base de datos puesta a disposición por el Servicio de Cambio Climático de Copernicus (<https://>

Tabla 3.1 - Frecuencia temporal de recolección de imágenes durante el período de tiempo adoptado para la elaboración del Atlas Solarimétrico de Paraíba.

Satélite	Extensión de las series temporales	Resolución temporal	Resolución espacial
GOES -13	De abril de 2003 a diciembre de 2017	Dos imágenes por hora	4 km
GOES -16	De enero de 2018 a diciembre de 2021	Seis imágenes por hora	1 km

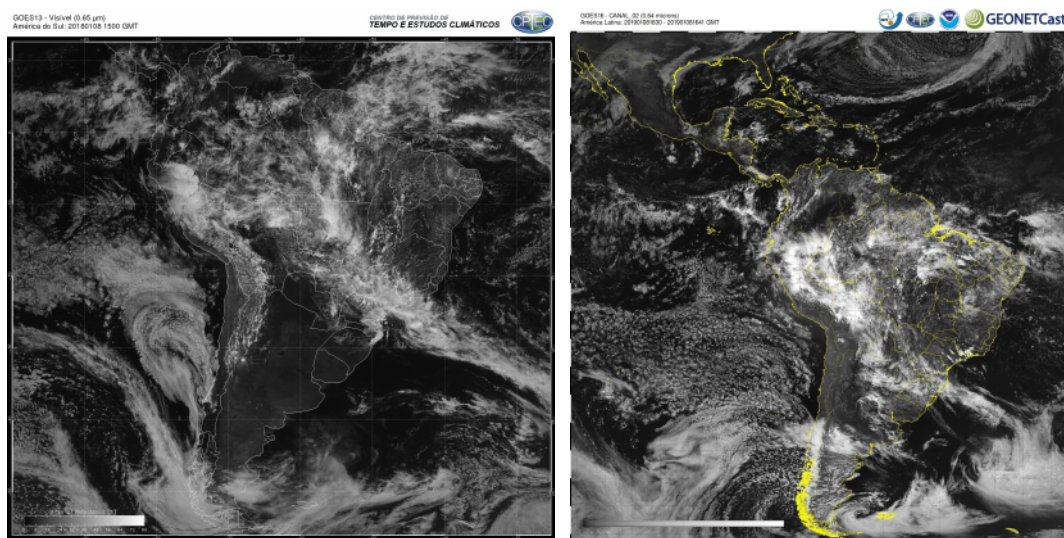


Figura 3.2 - Imágenes en el canal visible de los satélites GOES 13 (izquierda) y GOES 16 (derecha), en la proyección rectangular.

Fuente: DISSM/INPE.

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

El albedo o coeficiente de reflexión es la relación entre la radiación reflejada por la superficie y la radiación incidente sobre ella. Es de naturaleza adimensional y generalmente se mide en una escala de cero a 1. La función de distribución de reflectancia bidireccional (FDRB) proporciona la reflectancia de un objetivo en función de la geometría de iluminación y la geometría de visualización. Los cambios en la reflectancia y el albedo de una determinada superficie están relacionados con su geometría de iluminación y el tipo de superficie, siendo diferentes para diferentes longitudes de onda. Una de las metodologías para describir la variabilidad del albedo de la superficie utiliza funciones de distribución de reflectancia bidireccional (FDRB), combinando parámetros como la dispersión isotrópica, la dispersión en superficies horizontalmente homogéneas y la dispersión óptica geométrica. Siguiendo estos principios, el modelo BRASIL-SR utiliza datos de albedo espectral terrestre para calcular

la irradiación solar directa y difusa, obtenidos utilizando parámetros de las funciones FDRB y fórmulas polinómicas con coeficientes independientes de la longitud de onda. Los valores climatológicos mensuales en siete bandas de longitud de onda fueron interpolados linealmente para los 37 intervalos de longitud de onda y adoptados en BRASIL-SR. La base de datos utilizada para este procesamiento está disponible para acceso público en <http://tds.webservice-energy.org>.

Relieve y biomas

El modelo también utiliza datos de elevación topográfica para la corrección y parametrización de algunas de las variables atmosféricas utilizadas, además del mapa de bioma para la selección del conjunto de propiedades ópticas de los aerosoles, definidas a partir del bioma principal de cada punto de la cuadrícula. La base de datos de altitud para el territorio brasileño utilizada es GTOPO30, del EROS (Earth Resources Observation and Science) Data Center/United States Geological Survey (USGS), disponible en formato de cuadrícula con resolución de arco de 30 segundos (aproximadamente 1 km) y discretización vertical de aproximadamente 100 m. Los datos de bioma provienen del Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (IBGE), con una escala de 1:250.000 (Figura 3.3). Al igual que con el resto de los datos de entrada, los valores se interpolan al tamaño de píxel de la imagen de satélite utilizada.

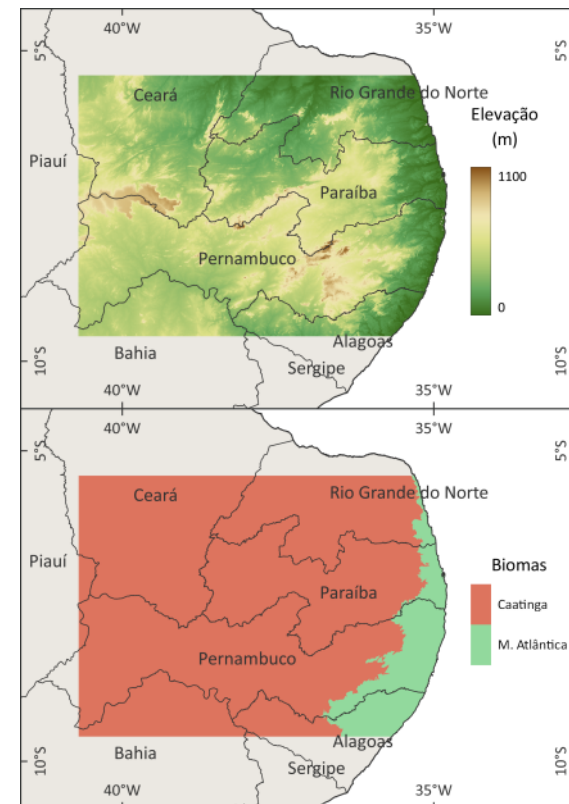


Figura 3.3 - Mapas de relieve (arriba) y bioma (abajo) utilizados en el modelo BRASIL-SR.

Fuente: EROS/USGS e IBGE

Procesamiento computacional

El modelo BRASIL-SR fue ejecutado para un área limitada (dominio), como se ilustra en la Figura 3.4, cubriendo una región que se extiende más allá de los límites del territorio del Estado de Paraíba con una cuadrícula rectangular en la resolución

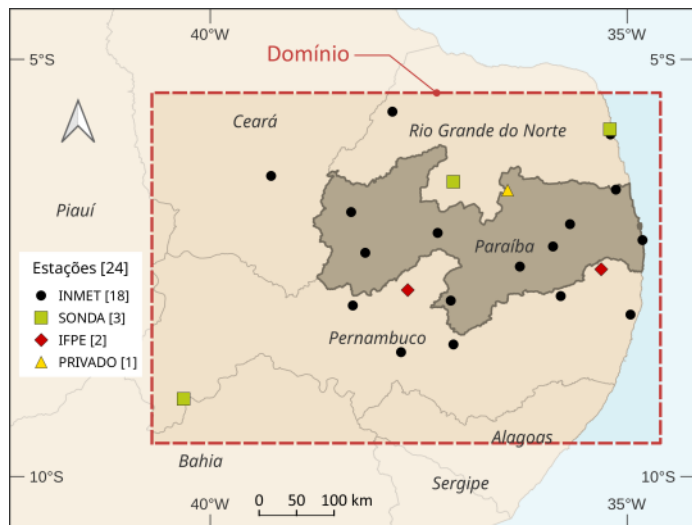


Figura 3.4 - El área demarcada por líneas discontinuas rojas representa la región adoptada en la configuración del modelo BRASIL-SR para obtener las estimaciones de la irradiación solar incidente total diaria en la superficie. Los puntos indican la ubicación de las estaciones de superficie.

horizontal de $0,04^\circ \times 0,04^\circ$ ($\sim 16 \text{ km}^2$). Este dominio comprende latitudes entre $9,46^\circ$ sur y $5,54^\circ$ sur y longitudes entre $40,46^\circ$ oeste y $34,62^\circ$ oeste. Todo el conjunto de datos meteorológicos y ambientales utilizados para alimentar el modelo se organizó para el dominio ilustrado en la Figura 3.4, incluyendo imágenes de satélite, temperatura del aire, humedad relativa y espesor óptico de los aerosoles, entre otros.

El área de dominio se definió con base en la localización de estaciones de superficie con disponibilidad de datos solarimétricos para evaluar las incertidumbres de las estimaciones de irradiación solar incidente en la superficie producidas por el modelo. Los datos solarimétricos observados en el territorio de Paraíba y los estados vecinos fueron seleccionados para

garantizar la representatividad de las zonas fronterizas del estado y permitir una evaluación rigurosa del desempeño del modelo BRASIL-SR en toda la extensión del estado de Paraíba. La base de datos observacionales incluye datos obtenidos de conjuntos de estaciones públicas administradas por el Instituto Nacional de Meteorología (INMET), el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE), el Instituto Federal de Pernambuco (IFPE) y de una estación privada de recolección de datos amablemente proporcionada por la Casa de los Vientos.

La elaboración de mapas del recurso solar presentada en este documento requirió una alta demanda computacional debido a la extensión del territorio de Paraíba, la cantidad de información almacenada en las bases de datos meteorológicas y ambientales y las imágenes satelitales utilizadas para alimentar el modelo. El modelo se ejecutó por un período de 120 meses (10 años), de modo que la demanda computacional debió atender la realización de las siguientes etapas:

- i. Preprocesamiento y almacenamiento de imágenes satelitales para el área de dominio;
- ii. Determinación de la nubosidad para cada imagen satelital almacenada;
- iii. Transferencia y procesamiento de datos meteorológicos y ambientales a la cuadrícula

rectangular del dominio utilizado;

- iv. Ejecución del modelo alimentado con las bases de datos preparadas y almacenadas en los pasos anteriores;
- v. Posprocesamiento de las estimaciones producidas y determinación de valores promedio mensuales y anuales de los totales diarios de irradiación solar en el territorio de Paraíba.

Todas las etapas mencionadas fueron procesadas en la nube, utilizando el servicio Amazon Elastic Compute Cloud (Amazon EC2), vendido por Amazon Web Services (AWS). Para una mayor eficiencia computacional, se eligió una instancia del tipo T3a: una instancia expansible de propósito general diseñada para aplicaciones que enfrentan picos temporales en el uso de la CPU. La infraestructura contratada contaba con 8 CPU virtuales (procesadores AMD EPYC serie 7000 a 2,5 GHz) y 32 GB de memoria RAM, conectadas a un SSD (unidad de almacenamiento de estado sólido) de propósito general con capacidad de 100 GB para carga rápida del sistema operativo y bibliotecas. Así como un HDD (disco duro) optimizado para entrada/salida con capacidad de 1 TB para almacenar los datos de entrada y salida del modelo.

Todas las bibliotecas computacionales que requeridas o que respaldan el modelo (incluidas bibliotecas científicas de acceso abierto como NetCDF y HDF5) se volvieron a compilar para optimizar su rendimiento para los procesadores disponibles en la instancia. Se utilizaron los compiladores del paquete Intel OneAPI (versión 2022.1.0) para garantizar la

compatibilidad con el modelo BRASIL-SR y el máximo rendimiento de las aplicaciones.

El volumen final de la base de datos de entrada (calculado después del preprocesamiento, que redimensiona los datos para la cuadrícula del dominio y comprime los archivos generados) presentó un tamaño aproximado de 27 GB. El procesamiento en sí tomó un total de aproximadamente 576 horas-máquina utilizando los 8 núcleos a tiempo completo, sin incluir las ejecuciones para probar, evaluar y ajustar la configuración del modelo, o el tiempo de descargar y pre-procesar los datos de entrada. Al final de las ejecuciones, se generaron 297 GB de datos de salida del modelo, de los cuales 283 GB comprenden datos de alta resolución ($0,01^\circ \times 0,01^\circ$).

Validación y análisis de incertidumbre

Los modelos atmosféricos o satelitales son herramientas útiles para mapear los recursos solares en alta resolución, sin embargo, es necesario que se cuantifiquen las incertidumbres, ya que impactan en el riesgo de un emprendimiento. La validación de la modelación utilizada para este Atlas consistió en comparar las estimaciones de irradiación solar total diaria, en sus componentes horizontal global (GHI) y normal directa (DNI), proporcionadas por el modelo satelital, con una base de datos observados recolectados en estaciones de

Estaciones solarimétricas

Las estaciones meteorológicas automáticas de INMET cumplen con el estándar del sistema de observación meteorológica mundial del Sistema de Observación Global perteneciente a la Organización Meteorológica Mundial (GOS/WMO), y cuentan con varios sensores que miden la presión atmosférica, temperatura del aire, humedad relativa, precipitación, radiación solar, dirección y velocidad del viento, entre otros. Cada estación cuenta con un piranómetro de segunda clase (ISO 9060:2018). Estas estaciones funcionan de forma autónoma y suelen tener limitaciones de mantenimiento preventivo y limpieza frecuente de las cúpulas del piranómetro, lo que resulta en un mayor porcentaje de datos eliminados durante la calificación. Sin embargo, es la base de mediciones radiométricas más completa disponible en el país.

Las estaciones de la Red SONDA se enfocan en recolectar y difundir datos ambientales para incentivar la expansión de fuentes solares y eólicas en el país. Sus plataformas solarimétricas siguen el estándar de la red Baseline Surface Radiation Network (BSRN) y utilizan sensores radiométricos de primer nivel, de acuerdo con los requisitos de la norma ISO 9060:2018. Las estaciones de la red SONDA cuentan con una gama más amplia de sensores, incluyendo típicamente seguidores solares que miden las componentes directa normal (DNI) y difusa (DHI) de la irradiación solar, y pudiendo incluir además pirgeómetros, sensores PAR, luxómetros, cámaras allsky, fotómetros solares y espectroradiómetros, entre otros.

La base de datos proporcionada por Casa de los Vientos fue obtenida mediante la operación de una estación que cumple con la norma EPE (DEE-RE-065/2013). Las estaciones EPE estándar cuentan con al menos dos piranómetros de segunda clase "Espectralmente Plano" o superior, de acuerdo con la norma ISO 9060:2018, asegurando redundancia para medir la irradiación global horizontal, además de medir la humedad relativa, la temperatura y la velocidad del viento.

Las estaciones pertenecientes a la Red Solarimétrica de Pernambuco incluyen estaciones que operan en diferentes instalaciones del Instituto Federal de Pernambuco. En este atlas se utilizaron únicamente datos recopilados en estaciones cercanas a la frontera del estado de Paraíba y equipadas con un seguidor solar, lo que permite medir las componentes directa normal (DNI) y difusa (DHI)



Ejemplo de estación estándar INMET.



Ejemplo de estación BSRN estándar.



Ejemplo de estación estándar EPE.

medición de superficie. Estos datos no fueron utilizados para ajustes estadísticos de los resultados del modelo BRASIL-SR, lo que garantiza que los errores obtenidos sean representativos para todo el estado de Paraíba.

Para el procedimiento de validación se utilizaron 24 estaciones de recolección de datos de superficie pertenecientes a centros meteorológicos, instituciones de enseñanza e investigación y empresarios privados, con el fin de garantizar la cobertura y representación espacial del estado de Paraíba y sus alrededores. Como resultado del proceso de control de calidad, descrito en el subtítulo a continuación, fueron seleccionadas 24 estaciones con mediciones confiables de la irradiación solar global, de las cuales, 4 tienen registrados datos de irradiancia directa:

- 18 (dieciocho) estaciones meteorológicas automáticas operadas por el Instituto Nacional de Meteorología (INMET), que contienen registros de irradiación solar global horizontal horarios. Los datos están disponibles a través del portal de INMET (<https://portal.inmet.gov.br/>) y tienen acceso público;
- 2 (dos) estaciones solarimétricas pertenecientes a la Red Solarimétrica de Pernambuco, operadas por el Instituto Federal de Pernambuco (IFPE). Los datos, de acceso público, pueden ser accedidos en el portal de la Red Solarimétrica de Pernambuco (<https://redesolpe.com.br/>);
- 3 (tres) estaciones solarimétricas pertenecientes a la Red SONDA, operadas por el

Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE) y ubicadas en Petrolina/PE, Caicó/RN y Natal/RN, con registros a cada minuto de las irradiancias global horizontal, difusa horizontal y directa normal (excepto Natal/RN). Todas las estaciones cuentan con datos de acceso público a través del portal de la Red SONDA (<http://sonda.cst.inpe.br/>);

- 1 (una) estación solarimétrica estándar EPE ubicada en la mesorregión de Campina Grande, Estado de Paraíba, perteneciente a empresarios privados.

Control de calidad

Es común que las mediciones solarimétricas presenten fallas y problemas de calidad con el paso de los años, lo que exige un control de calidad de las bases de datos observadas antes de su posterior utilización en la evaluación de incertidumbres de estimaciones proporcionadas por modelos computacionales de la irradiación solar incidente en superficie. Además de la acumulación de suciedad en los radiómetros, que es bastante común, la regularidad de la calibración, los errores de

conversión de señales y las interferencias provocadas por obstáculos son algunos de los problemas más frecuentes.

El control de calidad realizado cumplió con los criterios recomendados internacionalmente por la BSRN (Baseline Surface Radiation Network) combinados con otros sugeridos en documentos técnico-científicos (Gueymard, 2014; OMM no. 8, 2018). El algoritmo se dividió en cuatro etapas progresivamente más rigurosas, además de un análisis previo de consistencia. Como todo proceso de calificación automatizado está sujeto a fallas, también se realizó una inspección visual para la aprobación final de las mediciones. La Figura 3.5 ilustra gráficamente, en un diagrama de bloques, este procedimiento, mientras que la Tabla 3.2 muestra el porcentaje total de datos aprobados para las variables GHI y DNI.

Métricas estadísticas

Se realizaron comparaciones entre el modelo y las mediciones de superficie para cada estación individualmente y para todo el conjunto de datos disponible. Se utilizaron

Tabla 3.2 - Porcentaje total de datos aprobados para las variables GHI y DNI luego del proceso de calificación, considerando el número total de estaciones evaluadas.

Variable	Longitud de la serie temporal (en días)	Número de días aprobados	Porcentaje aprobado
GHI	49250	35048	71,2%
DNI	11750	7347	62,5%

métricas estadísticas convencionales definidas por el error medio (**bies**) y la raíz del error cuadrático medio (**RECM**). El **bies** indica la tendencia del modelo a sobrestimar (valores positivos) o subestimar (valores negativos) el potencial solar en una ubicación dada, mientras que el **RECM** es una medida de la dispersión entre los datos medidos y los datos estimados por el modelo, de modo que cuanto menor sean los valores, mejor será el desempeño. La correlación de Pearson (**r**) es una prueba que mide la relación estadística entre la irradiación estimada por el modelo y los valores observados en las estaciones de superficie. Se espera una asociación lineal entre los dos conjuntos de valores, por lo que los valores de **r** deben estar cercanos a 1,0 (uno). Las **Equações 1, 2 e 3** detallan estos índices.

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

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

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

donde y_i es el valor observado de la variable en el i -ésimo instante de tiempo, x_i es el valor de la misma variable producida por el modelo correspondiente al mismo instante de tiempo que el valor observado, y N es el número de registros de la variable siendo validada.

Se debe considerar que los valores altos de desviaciones de **bies** y **RECM** obtenidos para algunas estaciones no solo están relacionados con incertidumbres en la modelación computacional, sino también con incertidumbres en las mediciones de superficie. Los problemas relacionados con la suciedad, la calibración de los sensores e incluso los efectos de sombra debido a una ubicación inadecuada de la estación son difíciles de detectar y a menudo pasan desapercibidos para el control de calidad aplicado a los datos observados, incluso mediante inspección visual. En este sentido, se recomienda evaluar los errores siempre que sea posible para un conjunto mayor de estaciones, con el fin de reducir la relevancia de las incertidumbres de medición.

Las **Tabelas 3.3 y 3.4** muestran un resumen de las métricas de validación

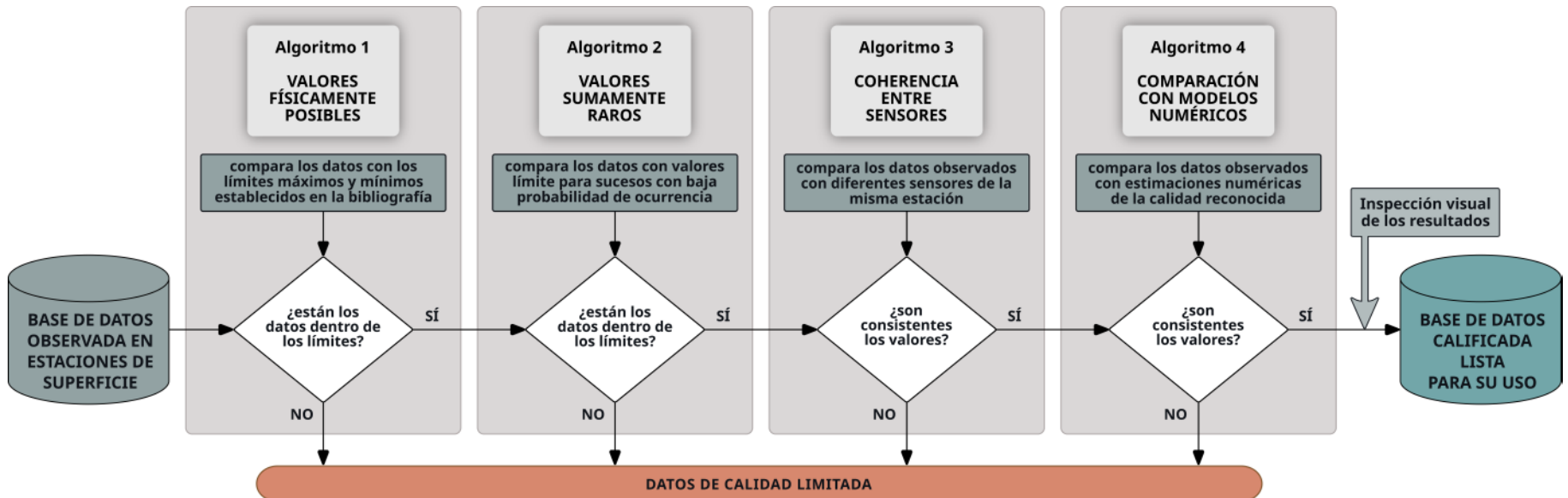


Figura 3.5 - Diagrama de flujo del proceso de cualificación de mediciones solarimétricas adoptado en este atlas.

Métricas GHI	Media observada (Wh/m ²)	Bies (Wh/m ²)	Bies (%)	RECM (Wh/m ²)	RECM (%)	Correlación (r)
Máximo	6096	386	7,1%	454	8,8%	0,98
Media	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

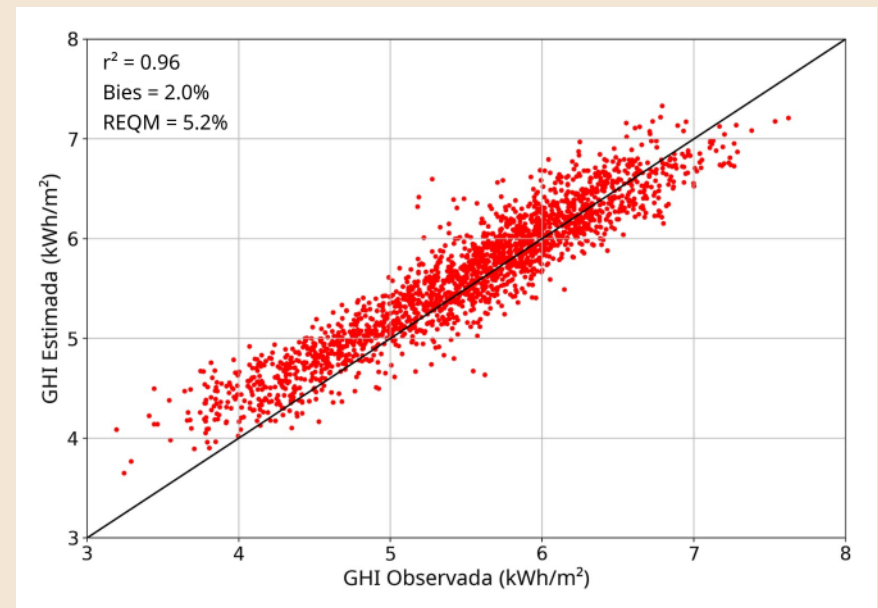
Tabla 3.3 - Métricas de validación de los resultados del modelo para la irradiación global horizontal total diaria.

Tabla 3.4 - Métricas de validación de los resultados del modelo para los totales diarios de irradiación directa normal.

Métricas DNI	Media Observada (Wh/m ²)	Bies (Wh/m ²)	Bies (%)	RECM (Wh/m ²)	RECM (%)	Correlación (r)
Media	5391	140	3,6%	590	11,5%	0,91
P50	5459	220	4,0%	554	11,0%	0,93

Diagrama de dispersión

La ilustración al lado muestra un diagrama de dispersión entre las medias mensuales de los totales diarios de GHI observados (abscisas) y estimados (ordenadas) para todas las estaciones analizadas. Existe una correlación lineal alta ($> 0,95$) y un bias relativo medio del 2%. El RECM relativo se sitúa en el 5,2%. Estas métricas son compatibles con las incertidumbres de los modelos de estimación por satélite. El pequeño bias positivo es apropiado, ya que hay que considerar que parte de las mediciones pueden subestimarse ligeramente debido a la suciedad de los domos debido a mantenimiento poco frecuente.



obtenidas para las variables GHI y DNI respectivamente, para todas las estaciones seleccionadas en el dominio de interés.

Se determinaron valores porcentuales de **bies** y **RECM** con relación al valor medio de las observaciones en las estaciones seleccionadas para el proceso de validación.

Los percentiles mostrados proporcionan información sobre la fracción de observaciones (o desviaciones) que están por debajo de su valor, calculado mensualmente. Así, por ejemplo, el percentil 25, o P_{25} , representa el límite superior del 25% de los registros presentes en el análisis estadístico, y así sucesivamente.

Las desviaciones de cada estación tienen el mismo peso en la determinación de los percentiles y en las medias finales. La media se refiere a la media aritmética de las 24 estaciones empleadas en el proceso de validación que pasaron el control de calidad. No hay ponderación por período de datos.

Comparación entre bases solarimétricas

Se encuentran disponibles varias bases de datos solarimétricas, a nivel regional, nacional y global, resultantes de diferentes métodos como la interpolación entre estaciones de superficie, modelación dinámica de meso-escala o global (reanálisis) y modelos satelitales. La base de datos del

Atlas de Energía Solar del Estado de Paraíba (Paraíba, 2022) fue desarrollada y validada utilizando el modelo satelital BRASIL-SR, que es una herramienta ampliamente difundida a través del Atlas Brasileño de Energía Solar (Brasil, 2017). Cabe señalar, sin embargo, que estas bases de datos tienen características diferentes, como se destaca en la **Tabla 3.5**.

La versión 2.0 del modelo BRASIL-SR trajo importantes mejoras en los algoritmos aplicables a condiciones de cielo despejado, en las funciones de reflectancia de la superficie y en la detección de nubosidad escasa en días secos. Además, los parámetros de transmitancia de nubes se ajustaron específicamente para la región de interés. Para ilustrar las diferencias de desempeño y mostrar la importancia de la modelación

solar regionalizada, la **Figura 3.6** presenta una comparación de los resultados de este Atlas (Atlas PB) con los de la base de datos del Atlas Brasileño de Energía Solar (Atlas BR) para un subconjunto de mediciones de alta confiabilidad. Puede verse en la **Figura 3.6** que el bias promedio para Atlas PB fue de $-0,09 \text{ kWh/m}^2$, en comparación con el valor de $-0,18 \text{ kWh/m}^2$ obtenido para el Atlas BR. Esto se debe a la versión mejorada del modelo BRASIL-SR y los ajustes de parametrizaciones específicos para el estado. Esto hizo innecesaria la corrección del bias, ya que la incertidumbre de las estimaciones fue próxima a las incertidumbres de las mediciones de campo. Se concluye que este Atlas presenta mayor confiabilidad para estimaciones de radiación solar para el Estado de Paraíba.

Tabla 3.5 - Principales diferencias entre las bases de datos generadas para el Atlas de Energía Solarimétrica de Paraíba (2023) y el Atlas de Energía Solar de Brasil (2017).

	Atlas Brasil 2017	Atlas Paraíba 2023
Periodo	1999 a 2015	2012 a 2021
Modelo / Versión	BRASIL-SR 1.2	BRASIL-SR 2.0
Resolución espacial	4 km	4 km / 1 km
Corrección de bias	Sí	No
Estaciones utilizadas	493 estaciones	24 estaciones

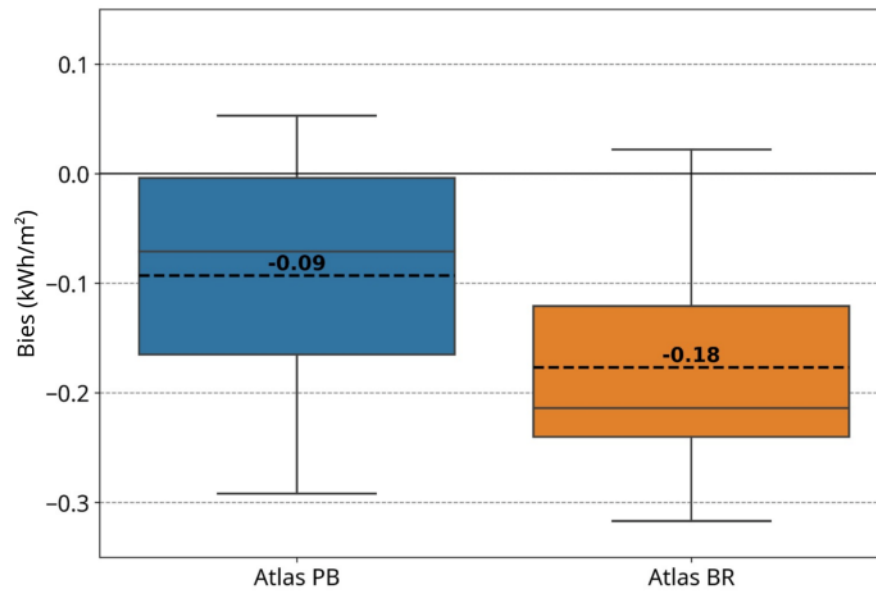


Figura 3.6 - Diferencias de bias entre las bases solarimétricas de Brasil-2017 (Atlas BR) y Paraíba-2023 (Atlas PB) para el subconjunto de mediciones de alta confiabilidad seleccionado. Se muestran los límites máximo y mínimo, la mediana (línea continua) y el rango intercuartil (cajas). Los valores de las medias (línea discontinua) están indicados en etiquetas.



CARTAS SOLARIMÉTRICAS

Las cartas solarimétricas fueron elaboradas a partir de los resultados de simulaciones del modelo BRASIL-SR para un período comprendido entre enero de 2012 y diciembre de 2021. Cada uno de los componentes de la irradiación solar incidente en la superficie está presentado mediante un mapa del promedio anual del total diario, siempre seguido de doce mapas con valores promedio mensuales del total diario. La secuencia de presentación de los gráficos es la siguiente: irradiación global en el plano horizontal (GHI), irradiación global en el plano inclinado a 10° con respecto al plano horizontal (GTI_{10}), irradiación directa normal a la superficie (DNI) e irradiación difusa en el plano horizontal (DHI).

Los mapas destacan una mayor incidencia de la energía solar en el oeste del estado de Paraíba, con valores medios de GHI de hasta $6,2 \text{ kWh/m}^2$ por día. Brejo Paraibano, ubicado entre las Regiones Inmediatas de Campina Grande y Guarabira (ver [Figura 1.1](#)), tuvo la menor incidencia de energía solar en la superficie (con valores de GHI de aproximadamente $5 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{día}$), pero aún mayor que la promedio

determinado en estudios anteriores (Pereira et al., 2017) para la irradiación solar GHI en el territorio brasileño (alrededor de $4,8 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{día}$).

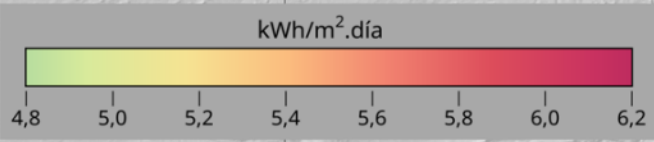
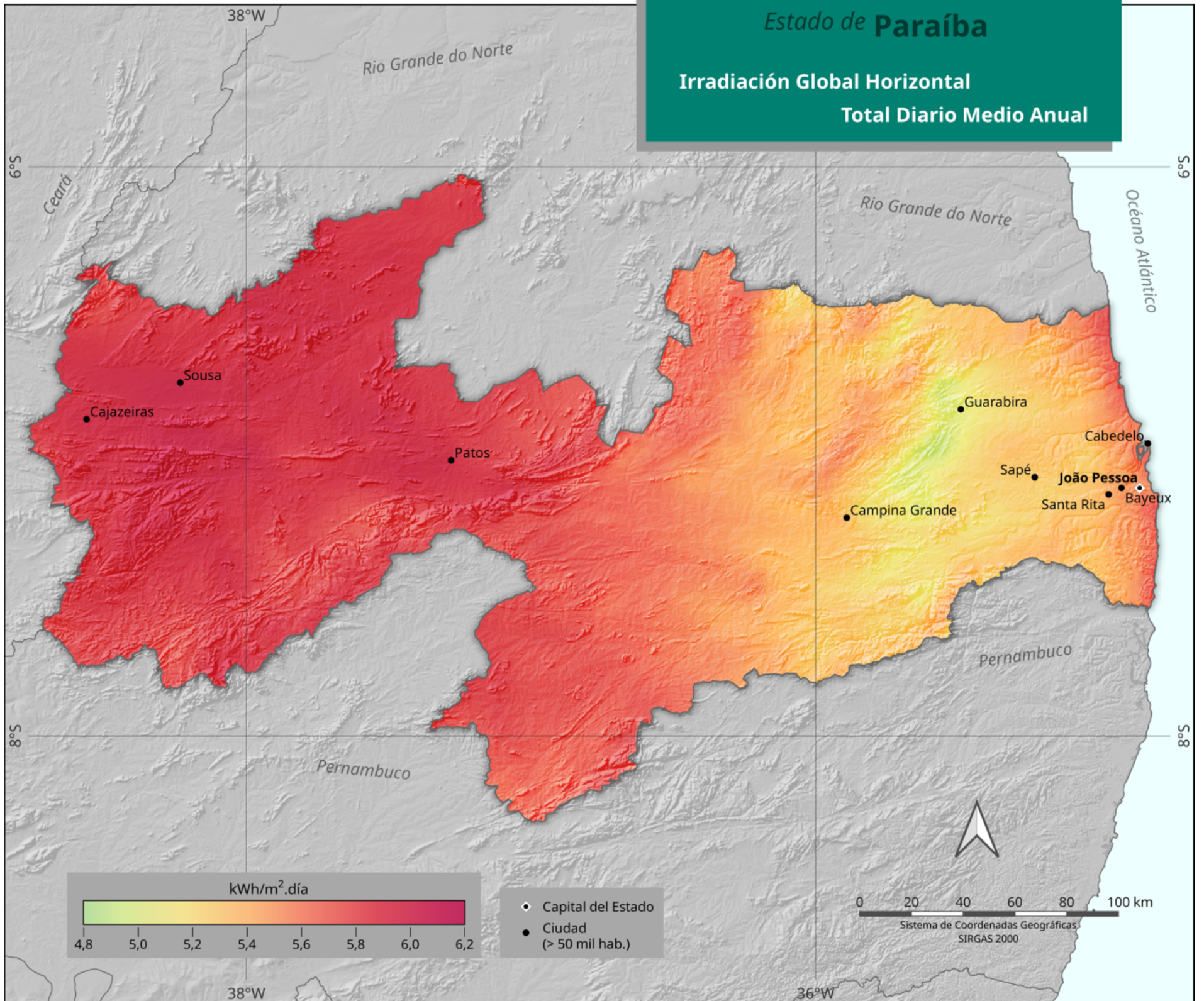
Los mapas también permiten identificar la variabilidad estacional de la incidencia de la energía solar en el territorio de Paraíba. El recurso de energía solar crece a partir de julio, alcanzando valores máximos en noviembre, cuando la componente GHI en superficie alcanza valores de hasta $7 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{día}$. La incidencia mínima de la energía solar en el territorio de Paraíba ocurre en junio, cuando los valores más altos de GHI observados en el oeste del estado rondan los $5,5 \text{ kWh/m}^2$. Es importante recordar la información presentada en el segundo capítulo de este Atlas sobre el ciclo estacional de precipitaciones en el estado - donde la temporada de lluvias se presenta principalmente entre los meses de febrero y junio, dependiendo de la región del estado.

Las cartas solarimétricas fueron elaboradas con una resolución espacial de alrededor de 16 km^2 , permitiendo detallar de forma espacial la información sobre la radiación solar incidente en la región. Esto

es de suma relevancia para empresarios del sector energético y otros interesados en conocer la disponibilidad de este recurso en el Estado de Paraíba. El acceso detallado está disponible en la Herramienta Web puesta a disposición por la Secretaría de Infraestructura y Recursos Hídricos del Estado de Paraíba, donde además de verificar los valores anuales y mensuales del recurso solar, el usuario puede realizar simulaciones básicas y aprender sobre el potencial estimado de generación de electricidad a partir de energía solar en puntos o incluso zonas de interés. Sin embargo, es importante señalar que la Herramienta Web no puede ser utilizada para dimensionar sistemas de generación solar, ya que la implementación de estos sistemas requiere la elaboración del proyecto ejecutivo por profesionales calificados para garantizar el cumplimiento de los requisitos técnicos específicos asociados a las características del lugar de instalación (posibles sombreados, geometría de iluminación, infraestructura de soporte de módulos fotovoltaicos, etc.) y lo establecido en la normativa publicada por la empresa concesionaria de energía.

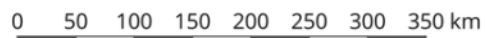
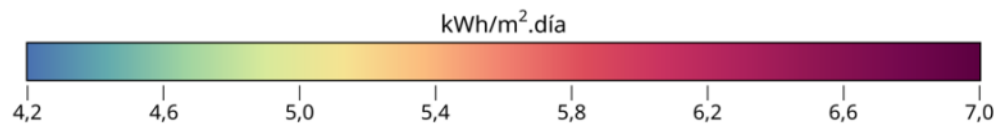
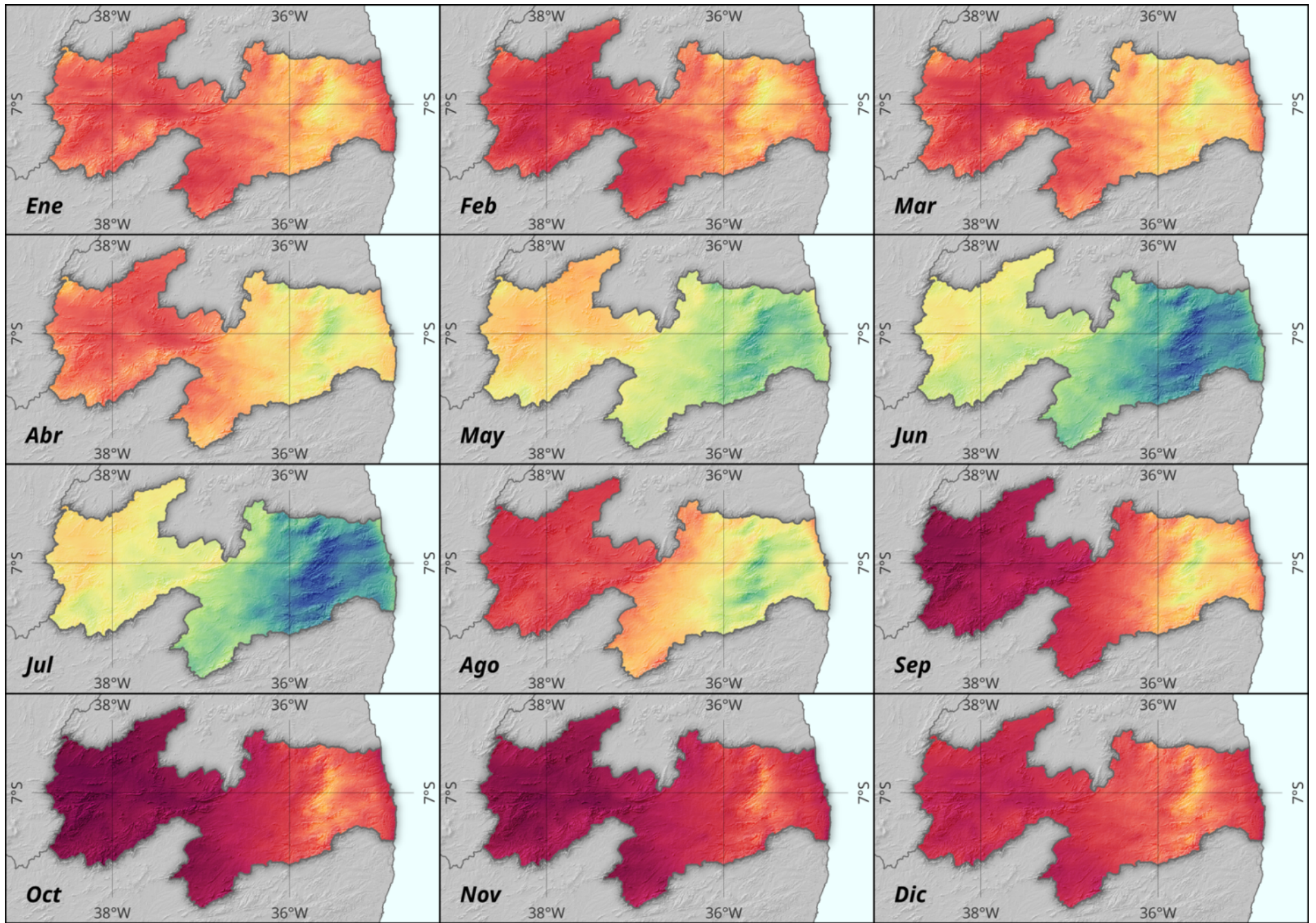
Estado de Paraíba

Irradiación Global Horizontal Total Diario Medio Anual



- Capital del Estado
- Ciudad (> 50 mil hab.)





Sistema de Coordenadas Geográficas
SIRGAS 2000

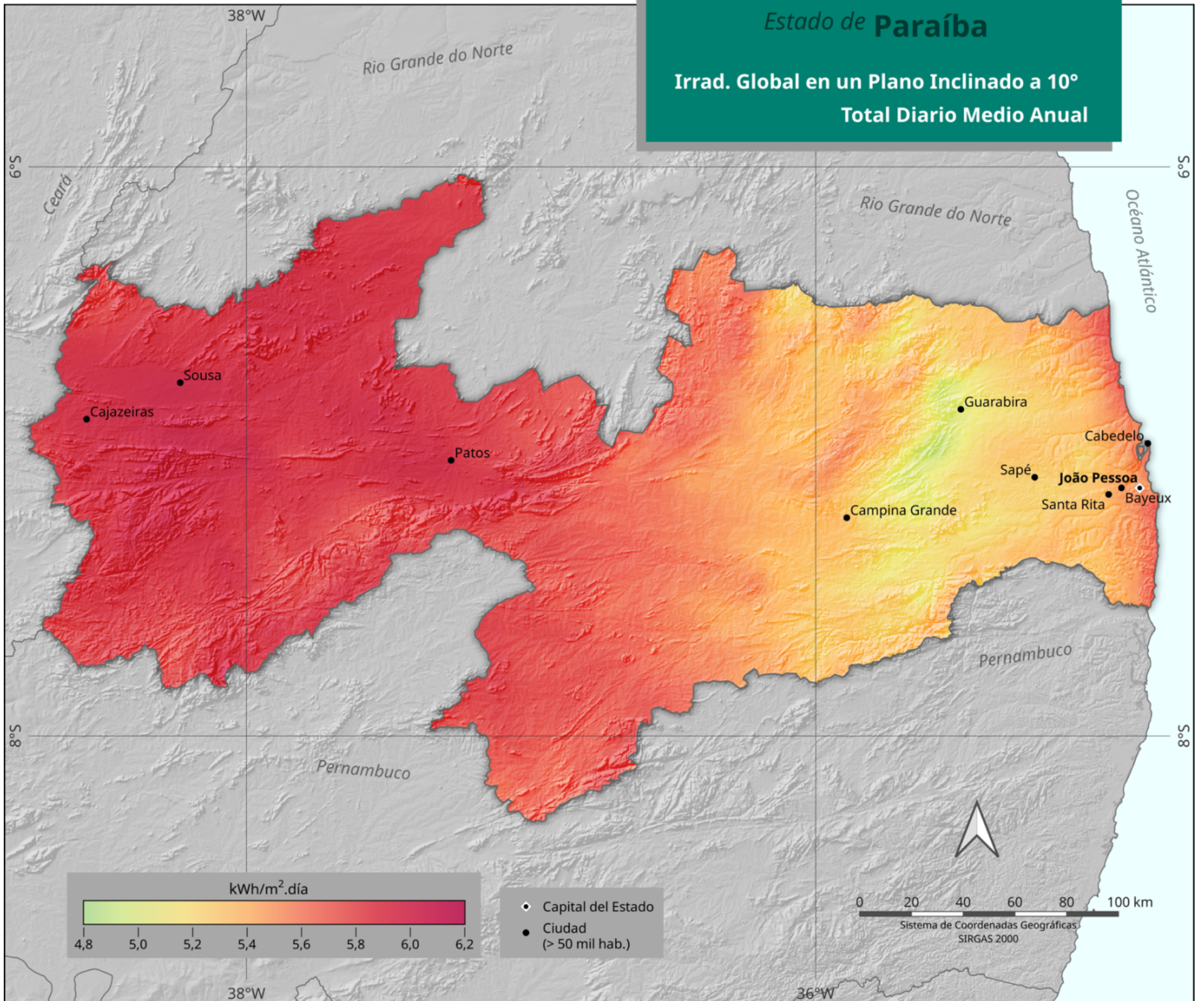
Estado de **Paraíba**

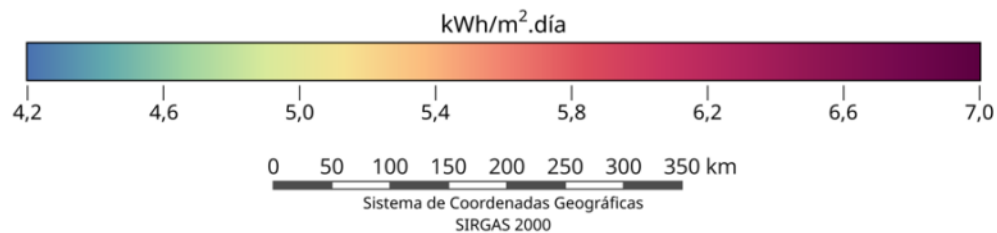
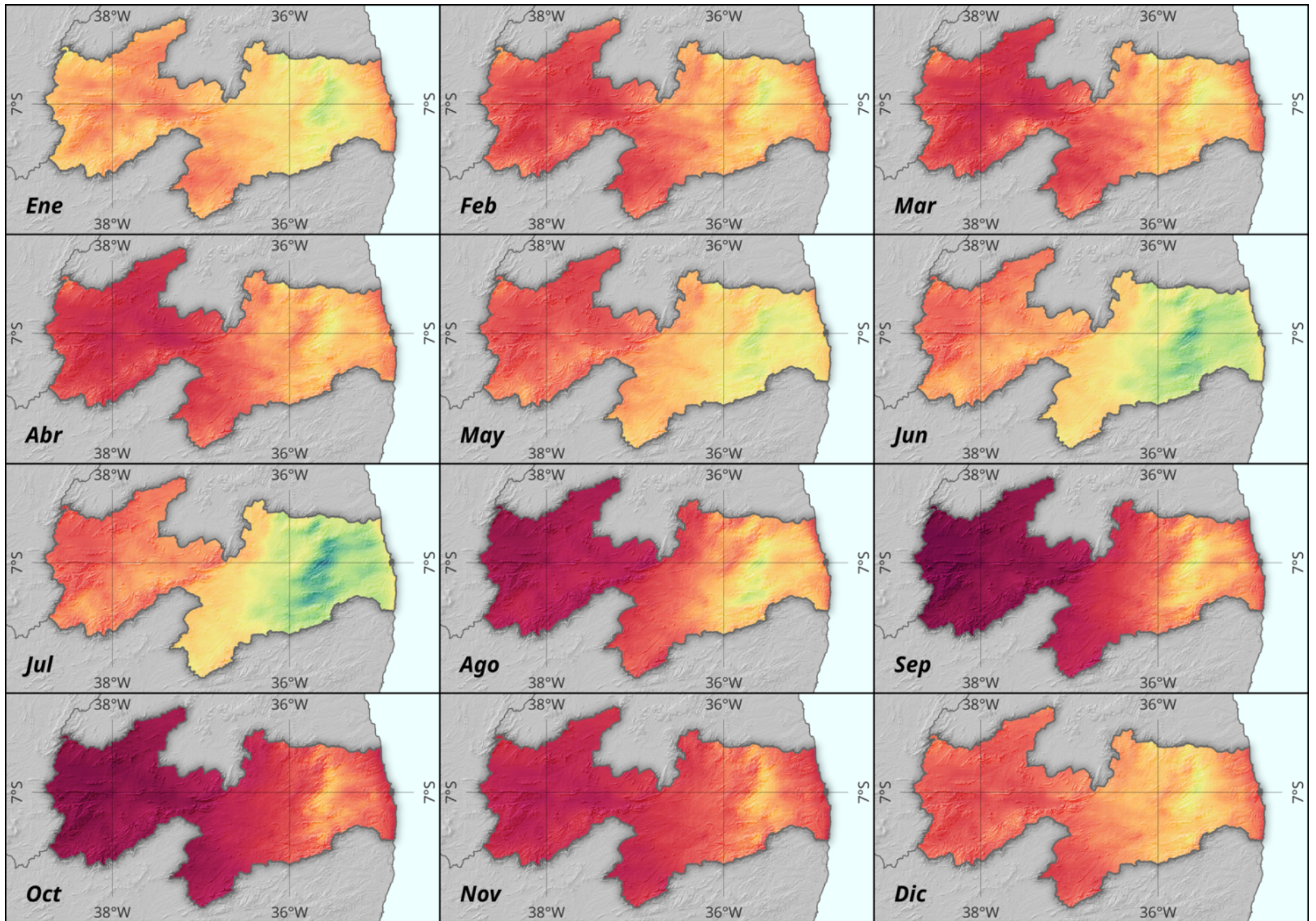
Irradiación Global Horizontal

Total Diario Medio Mensual

Estado de Paraíba

Irrad. Global en un Plano Inclinado a 10°
Total Diario Medio Anual





Estado de **Paraíba**

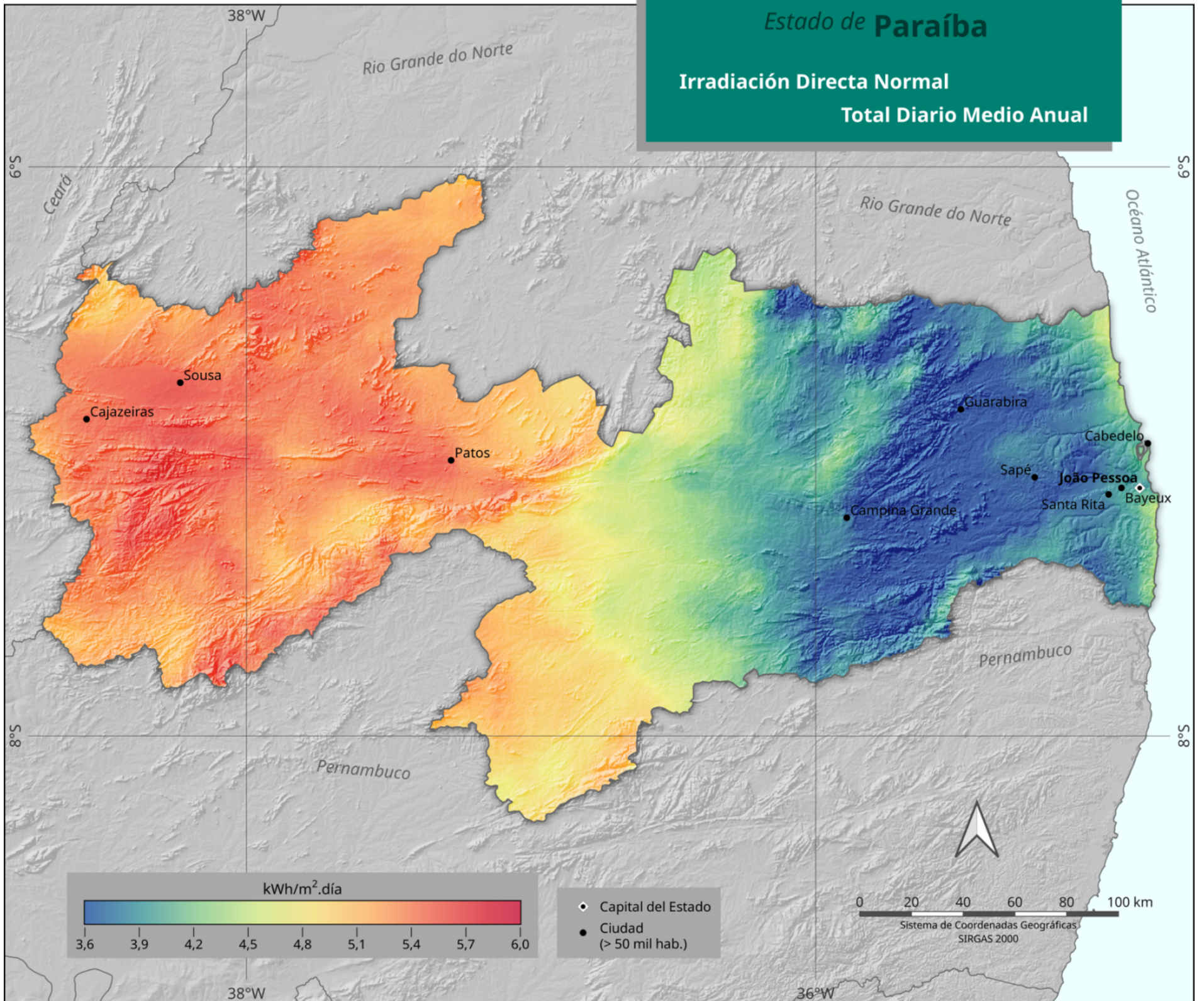
Irrad. Global en un Plano Inclinado a 10°

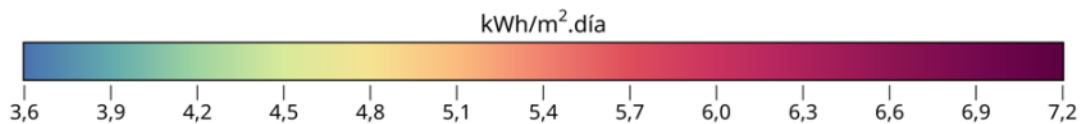
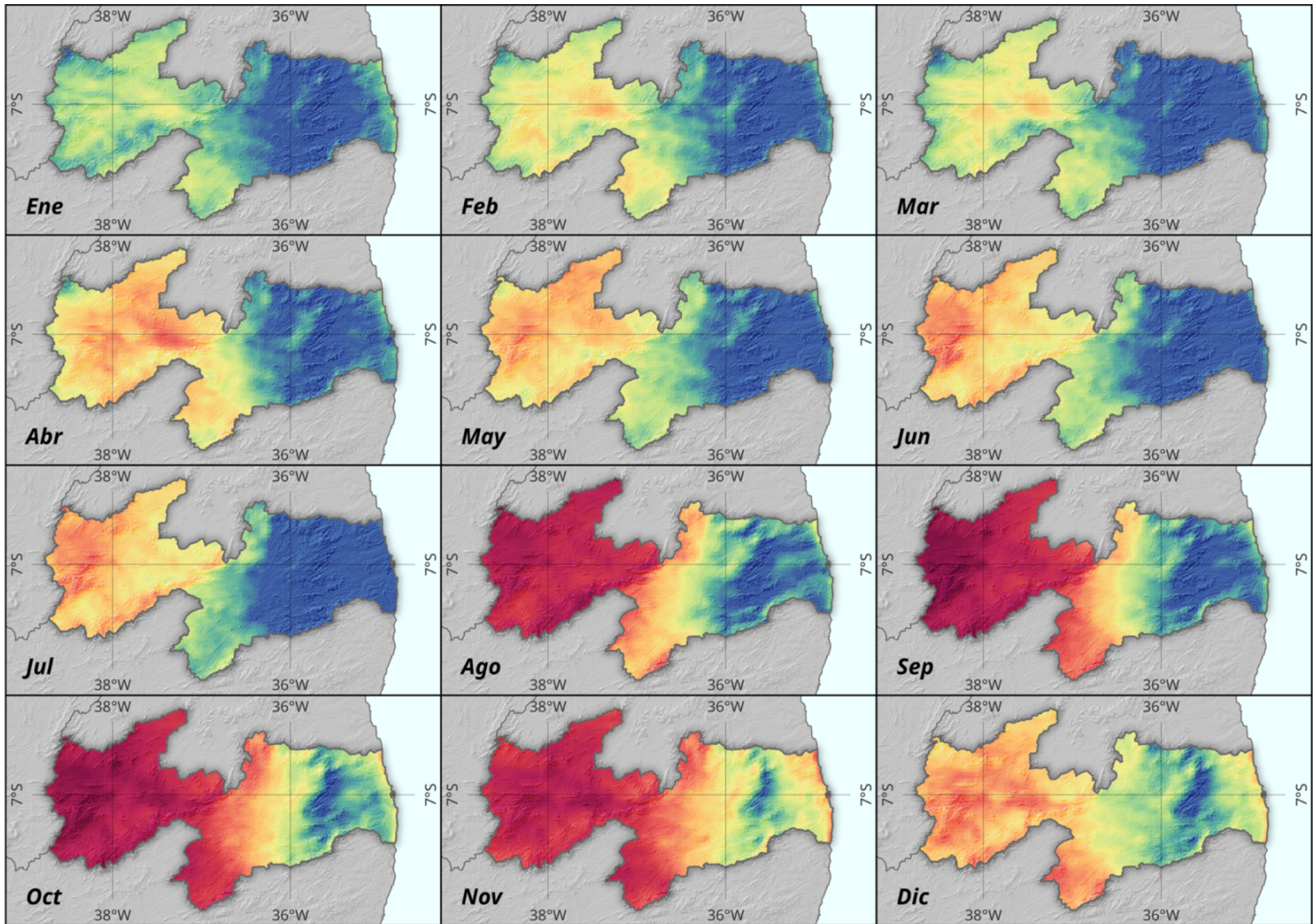
Total Diario Medio Mensual

Estado de Paraíba

Irradiación Directa Normal

Total Diario Medio Anual





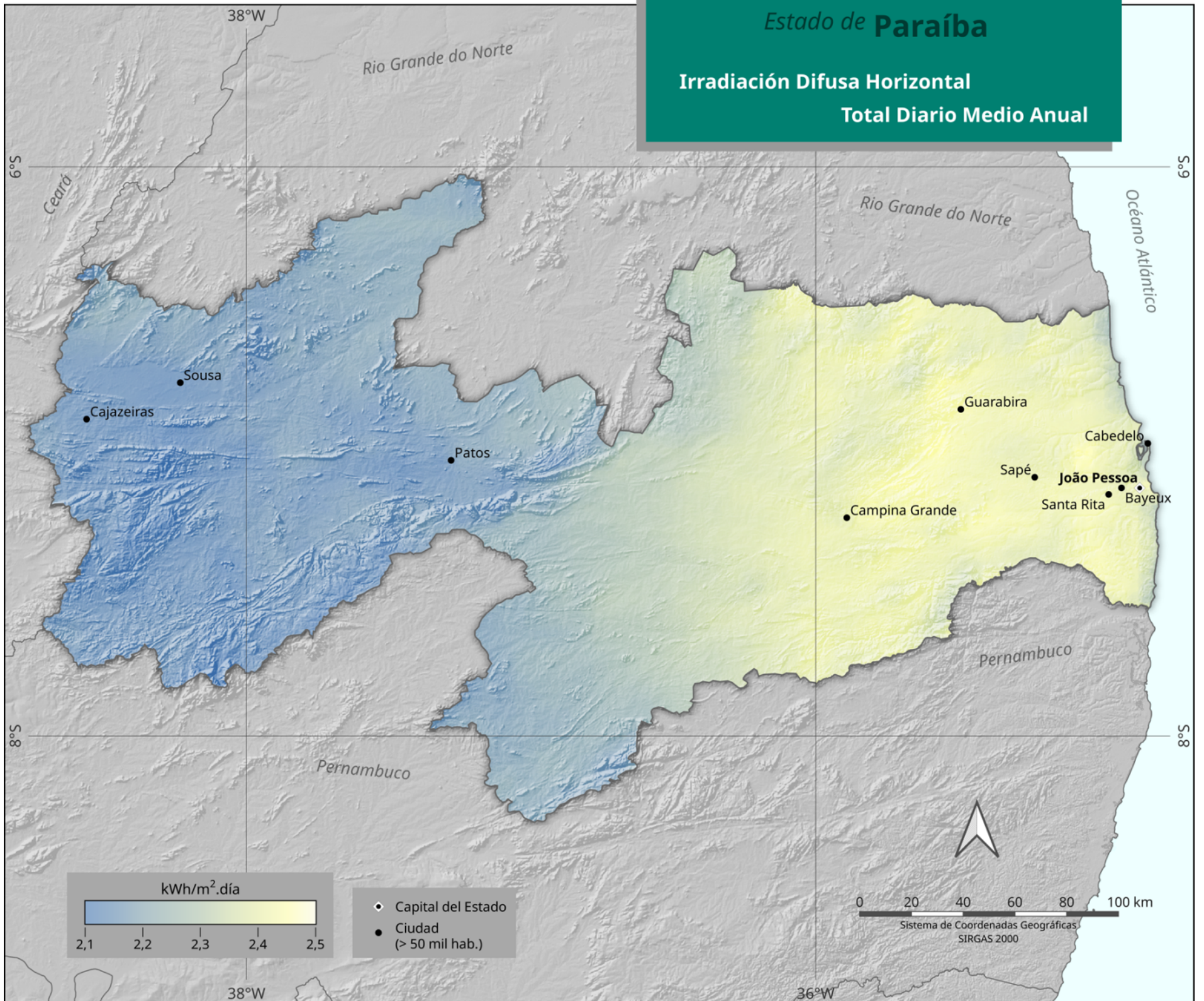
Estado de **Paraíba**

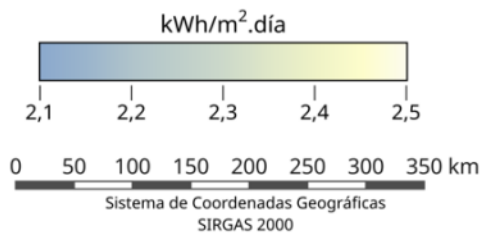
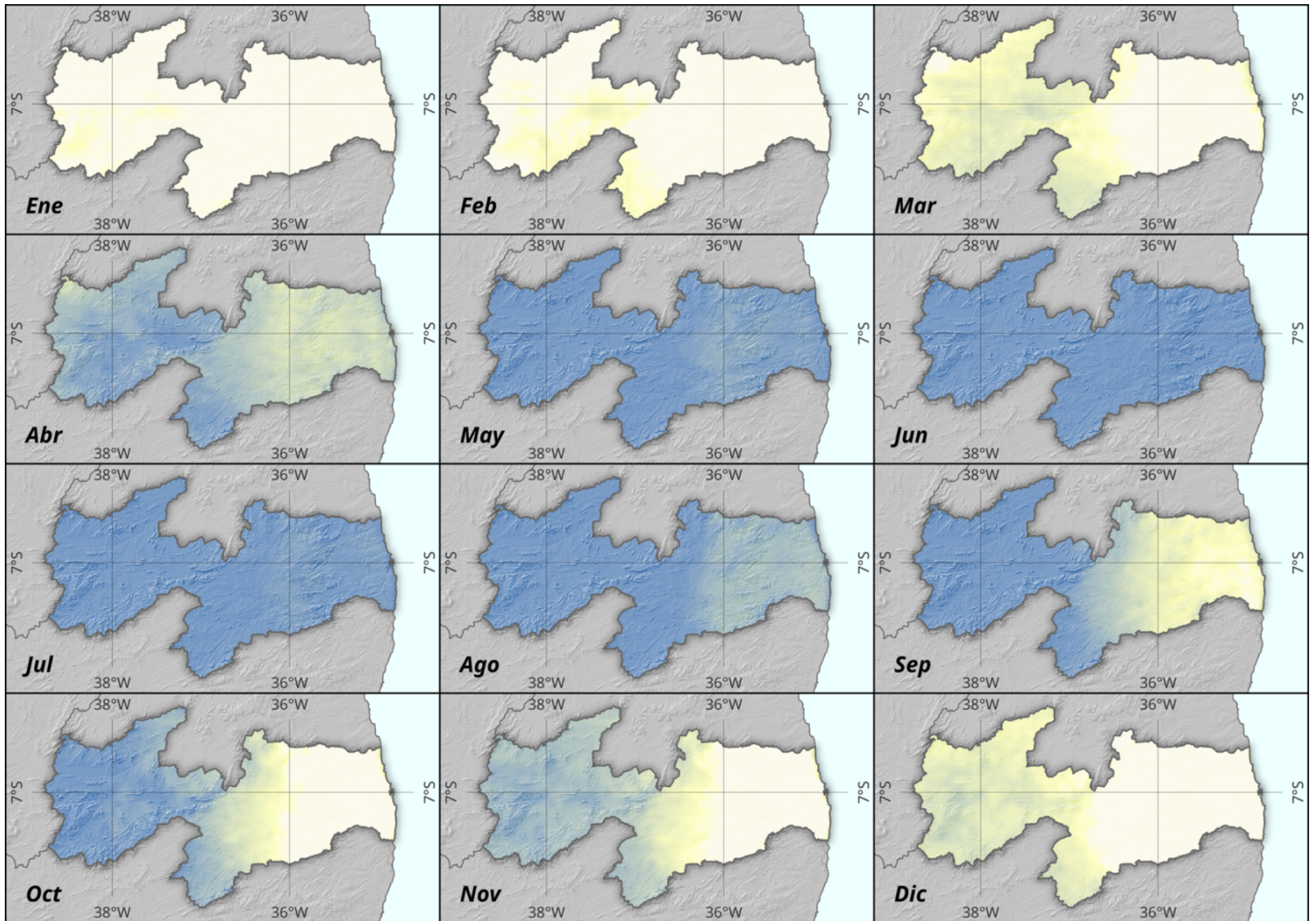
Irradiación Directa Normal

Total Diario Medio Mensual

Estado de Paraíba

Irradiación Difusa Horizontal Total Diario Medio Anual





Estado de **Paraíba**
Irradiación Difusa Horizontal
Total Diario Medio Mensual



POTENCIAL DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

En esta sección se presenta un análisis del potencial de aplicación de los sistemas de aprovechamiento de energía solar fotovoltaica en el estado de Paraíba.

Potencial teórico

Se entiende por potencial teórico el potencial disponible para la generación solar fotovoltaica, suponiendo que los módulos estarían instalados en condiciones ideales para la generación fotovoltaica, es decir, módulos orientados al norte geográfico con una inclinación de 10° con respecto al plano horizontal y sin sombreado.

El cálculo del potencial teórico utilizó la base de datos de Irradiación Global en el Plano Inclinado de 10° (GTI_{10}), suponiendo el uso de todos los espacios posibles en el territorio de Paraíba para la generación solar – tasa de ocupación del 100%. Para este análisis no se adoptó ningún tipo de restricción espacial, por lo que también se incluyeron en el cálculo las áreas protegidas e inundables.

No se consideraron pérdidas ópticas y eléctricas en la generación y transmisión de energía, ya que se proyecta desarrollo y mejoras tecnológicas futuras. Esta premisa equivale a asumir una Tasa de Rendimiento del sistema fotovoltaico igual al 100%.

Además de las suposiciones descritas anteriormente, el cálculo asumió:

- una área superficial del Estado de Paraíba de 56.467,242 km² (IBGE, 2022);
- el valor medio de la Irradiación Global Inclined a 10° (GTI_{10}) en el territorio de Paraíba determinado en 5,73 kWh/m².día;
- el uso de módulos fotovoltaicos con la tecnología más comúnmente usada en el mercado actualmente: silicio monocristalino, bifacial con una potencia de 650Wp, con una superficie aproximada de 3,1 m² y una eficiencia del 21%.

Una vez adoptadas estas hipótesis, el potencial teórico obtenido es de aproximadamente **12 TWp**, capaz de generar alrededor de **70 TWh/día** o **25.550 TWh/año**. A modo de ejemplo, una superficie con sólo el 0,02% del estado de Paraíba sería suficiente para generar una

cantidad de electricidad equivalente al consumo energético de todo el estado en 2021, que fue de 5.881 GWh.

Potencial técnico

Al igual que en la determinación del potencial teórico, la evaluación del potencial técnico de generación fotovoltaica supone las condiciones ideales para la generación, es decir, módulos orientados al norte geográfico con una inclinación de 10° con respecto al plano horizontal y sin sombreado. Adicionalmente, se establecieron las siguientes hipótesis:

- potencial teórico previamente calculado;
- exclusión de áreas con restricciones ambientales y geográficas: acueductos, áreas de preservación permanente (margen de 50 metros para cursos de agua), masa de agua (margen de 100 metros), canales de transposición (margen de 50 metros), áreas urbanas (margen de 500 metros), pendientes superiores a 5 grados, carreteras (margen de 100 me-

tros), vías férreas (margen de 100 metros), tierras indígenas, tierras quilombolas, unidades de conservación;

- las pérdidas ópticas y eléctricas en el sistema fotovoltaico fueron consideradas utilizando una Tasa de Rendimiento (rendimiento) igual al 75%;
- tasa de ocupación con módulos fotovoltaicos igual a 44 MWp/km², valor típico observado en plantas fotovoltaicas centralizadas que operan en el territorio brasileño.

Considerando estas premisas, el potencial técnico fue determinado como siendo de aproximadamente **1,54 TWp**, capaz de generar en torno de **6,88 TWh/día** o **2.512 TWh/año**.

Potencial económico - I

El primer escenario económico para el potencial de generación fotovoltaica asume como punto de partida el potencial técnico determinado en la sección anterior, agregando una restricción para la distancia entre el lugar de interés para la generación y el punto próximo para conexión al Sistema Interconectado Nacional (SIN):

- distancia máxima igual o inferior a 30 km del local de interés al punto de conexión a la red (líneas superiores a 69 kV).

Así, el resultado obtenido para el potencial económico I es de aproximadamente 1,46 TWp, capaz de generar alrededor de 6,51 TWh/día o 2.375 TWh/año.

Potencial económico - II

El segundo escenario de potencial económico considera, además de las suposiciones consideradas en los escenarios anteriores, la siguiente restricción:

- distancia máxima del local de interés al punto de conexión a la red (líneas superiores a 69 kV) igual o inferior a 10 km.

Así, el potencial económico II resulta en aproximadamente **907 GWp**, capaces de generar alrededor de **4,05 TWh/día** o **1.479 TWh/año**. Para comprender su representatividad, este potencial económico indica que sólo el 0,14% de la superficie del estado sería suficiente para generar una cantidad de electricidad igual al consumo registrado en el año 2021 para todo Paraíba, alrededor de 5.881 GWh.

Potencial económico - III

El tercer escenario adoptado para el potencial económico de los recursos solares en el estado de Paraíba tiene como objetivo evaluar el uso de energía solar en sistemas de generación distribuida instalados en los techos de edificios en áreas urbanas. Para ello se adoptaron las siguientes suposiciones:

- directrices indicadas en la Nota Técnica DEA/EPE 19/14 - Inserción de la Generación Distribuida Fotovoltaica en Brasil - Condiciones e Impactos;

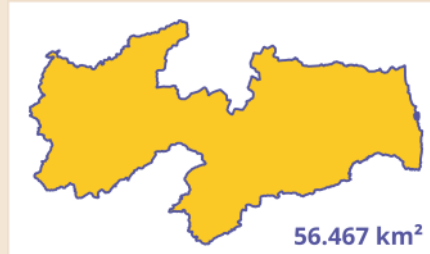
- la información sobre el número y tipo de residencias (casa o departamento) se obtuvo del CENSO del IBGE de 2010 para áreas urbanas (Fuente: <https://sidra.ibge.gov.br/>); cuando se imprimió este documento, los datos detallados del Censo de 2022 aún no estaban disponibles;
- se asumió una superficie media de tejado de 85 m² para las casas y 15 m² por apartamento;
- se adoptó el número total de hogares en un área urbana del Estado de Paraíba de 829.761 con datos del IBGE (2022);
- factor de aprovechamiento del 30% del área final encontrada para sistemas fotovoltaicos conectados a la red;
- base de datos de Irradiación Global en el Plano Inclinado a 10° (GTI₁₀);
- sistema de generación basado en módulos fotovoltaicos Mono-PERC con una potencia aproximada de 650 Wp, un área aproximada de 3,1 m² y una eficiencia del 21%.

Considerando estas suposiciones, el potencial económico III se estima en aproximadamente **4,16 GWp**, capaz de generar alrededor de **17,87 GWh/día** o **6,52 TWh/año**, es decir, una energía mayor que la demanda eléctrica del estado, siendo posible exportar el excedente a el Sistema Interconectado Nacional (SIN).

La **Figura 5.1** presenta el concepto de generación distribuida.

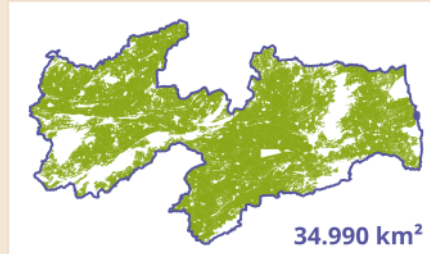
Potencial de generación fotovoltaica

**POTENCIAL
TEÓRICO**
25.550 TWh/año



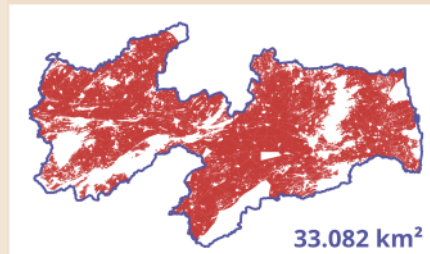
Datos de irradiación en un plano inclinado a 10°;
Módulos fotovoltaicos en condiciones ideales;
Tasa de rendimiento = 100%;
Área total del estado de Paraíba considerada
(tasa de ocupación = 100%).

**POTENCIAL
TÉCNICO**
2.512 TWh/año



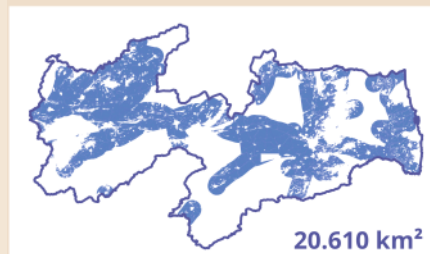
Utilizando el potencial teórico, se excluyen: áreas con pendiente superior a 5 grados, conductos de agua, áreas de preservación permanente, cuerpos de agua, canales de transposición, áreas urbanas, carreteras, vías férreas, tierras indígenas, tierras quilombolas y unidades de conservación.

**POTENCIAL
ECONÓMICO I**
2.375 TWh/año



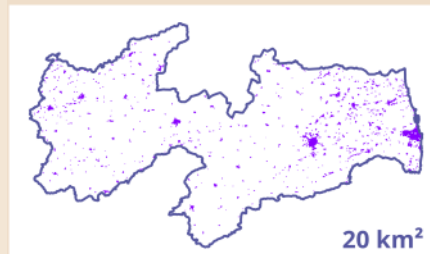
Utilizando el potencial técnico, también se excluyen las zonas situadas a más de 30 km de las líneas de transmisión y distribución.

**POTENCIAL
ECONÓMICO II**
1.479 TWh/año



Se utiliza el potencial económico I, excluyendo también las zonas situadas a más de 10 km de las líneas de transmisión y distribución.

**POTENCIAL
ECONÓMICO III**
6,52 TWh/año



Sistemas de generación distribuida instalados en los tejados de edificios en zonas urbanas;
Adopción de la Nota Técnica DEA/EPE 19/14;
Superficies medias de tejado de 85 m² para casas y 15 m² para apartamentos.

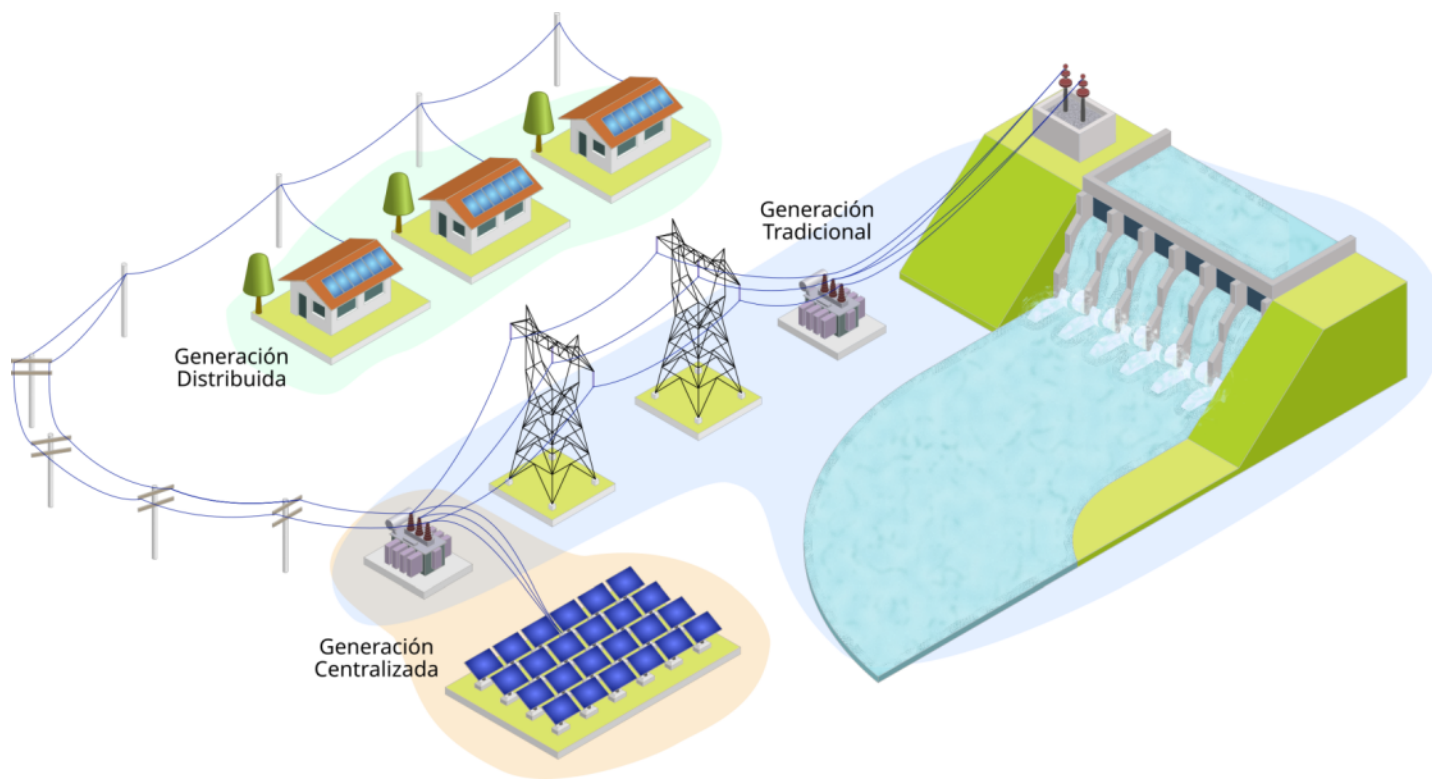


Figura 5.1 - Instalaciones fotovoltaicas en viviendas, industrias o edificios y en zonas rurales.



OTROS ASPECTOS RELEVANTES

Energía solar térmica (o termosolar)

El aprovechamiento térmico de la energía solar ha sido realizado desde la antigüedad por nuestra sociedad, siendo una forma sencilla y eficiente de convertir energía para diversas aplicaciones, desde calentamiento de agua, insumo para procesos industriales, deshidratación y cocción de alimentos hasta para la generación de electricidad.

Calentamiento de agua

Los edificios comerciales, públicos y residenciales son responsables de gran parte del consumo eléctrico en Brasil y, en los hogares brasileños, la ducha eléctrica es el equipamiento con mayor participación en ese consumo. Una alternativa para reducir el consumo eléctrico, especialmente en el sector residencial, es el uso de calentadores de agua solares. La [Figura 6.1](#) ilustra el funcionamiento de un calentador solar residencial.

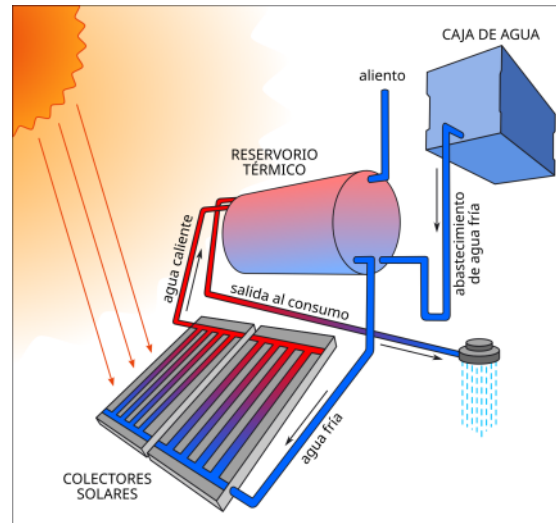


Figura 6.1 - Esquema de un sistema doméstico de bajo costo para calentar agua mediante energía solar.

El Estado de Paraíba, aunque no presenta altas amplitudes térmicas durante todo el año en comparación con los estados del sur y sureste, aún puede beneficiarse del uso de energía solar térmica en procesos industriales que demandan agua calentada. La industria textil y las agroindustrias, como la de productos lácteos y los galpones procesadores de frutas, son algunos ejemplos de sectores que podrían reducir el

consumo de electricidad (o leña) a partir de la calefacción solar térmica para sus procesos industriales.

Generación de electricidad

La energía solar térmica también se puede utilizar para generar electricidad. Se están desarrollando plantas helio-térmicas o CSP (Concentrated Solar Power) de forma experimental y incluso comercial con el fin de añadir estabilidad a la generación de electricidad solar. Los concentradores constan de campos de espejos, en la configuración de torre central, o de cilindros parabólicos/espejos de Fresnel en la concentración lineal (la [Figura 2.10](#), citada anteriormente, ilustra estos sistemas). En ambos, el calor se utiliza para vaporizar un fluido y mover turbinas convencionales acopladas a generadores. Las plantas con torres centrales aún enfrentan obstáculos para su implementación en Brasil debido a la alta variabilidad de la irradiación solar en lugares con mayor insolación, debido a las características de la atmósfera tropical, además de los altos costos de implantación

y operación, que dificultan estos proyectos, tornándolos poco competitivos. Por otro lado, las soluciones híbridas que combinan un concentrador solar lineal con otra fuente de calor complementaria (como la biomasa) vienen ganando atención y pueden convertirse en alternativas importantes para integrar la matriz de generación brasileña en el futuro.

Complementariedades (generación híbrida)

Si bien la radiación solar no es una fuente de energía despachable, ya que depende de las fluctuaciones del entorno meteorológico, las plantas híbridas solar-eólicas han surgido como una alternativa para reducir esta variabilidad en el parque generador, además de reducir costos al compartir infraestructura. En este contexto, los estados del noreste de Brasil se destacan por la abundancia de estas dos fuentes de energía. Además, considerando que el SIN es alimentado principalmente por centrales hidroeléctricas, por lo que muestra una fuerte dependencia del régimen hídrico, el mismo puede beneficiarse de la penetración de la fuente solar. Como regla general, los períodos secos se caracterizan por una menor nubosidad y, por tanto, mayores niveles de irradiación solar. Períodos de vientos (alisios) más intensos también se caracterizan por menos precipitaciones en la región noreste, como ya han demostrado

varios estudios. Así, la complementariedad entre fuentes hidro-solares-eólicas (Figura 6.2) se presenta como una oportunidad importante para maximizar el uso de energías renovables con seguridad y bajo impacto ambiental.

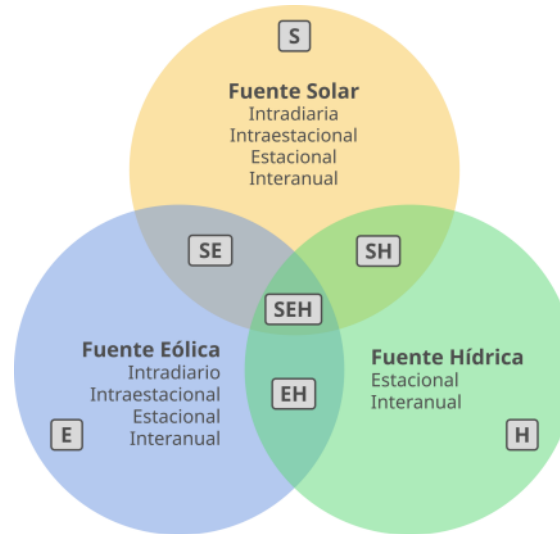


Figura 6.2 - Diagrama sistematizador de posibles complementariedades entre fuentes renovables, así como sus respectivas escalas de variabilidad.

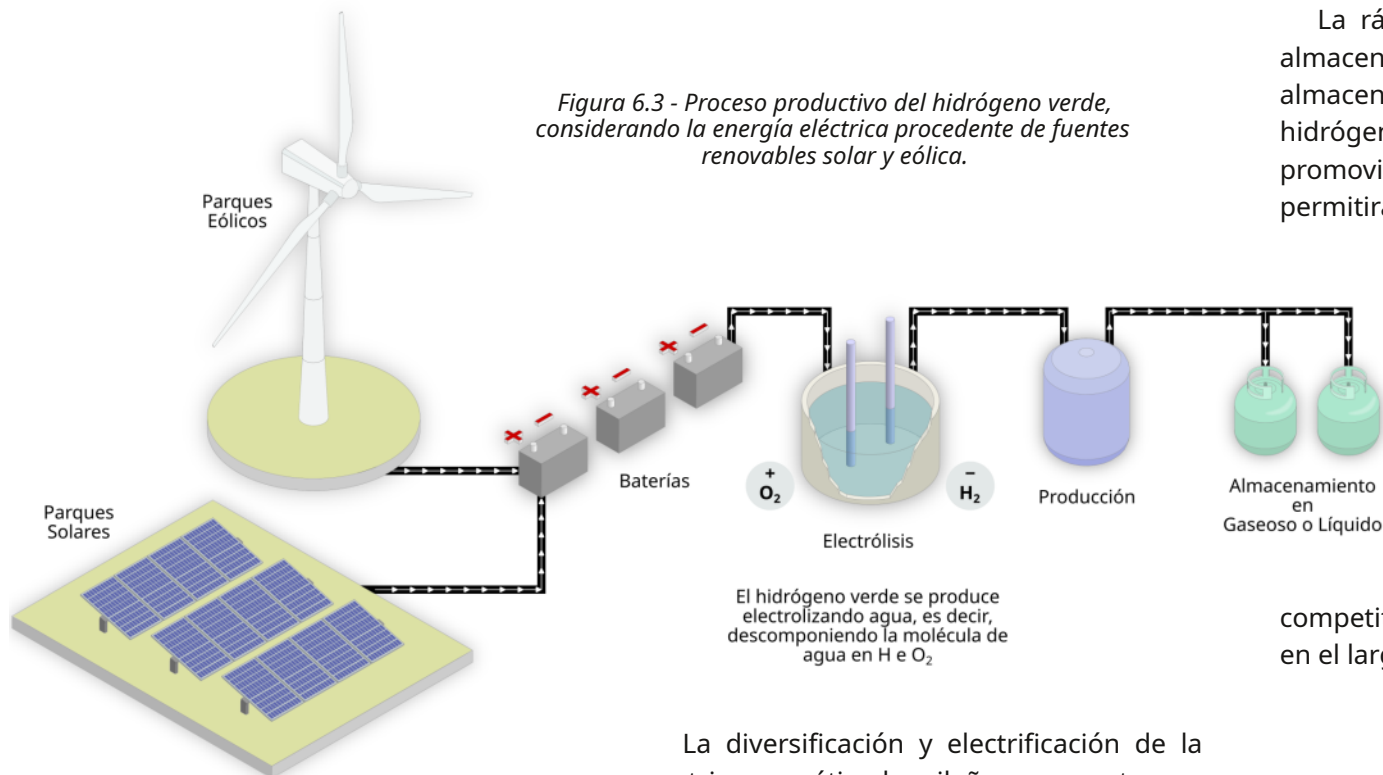
Fuente: André Gonçalves, 2017.

Hidrógeno verde

El hidrógeno producido a partir de fuentes renovadas de energía, conocido como hidrógeno verde, se está destacando como un nuevo vector energético para la descarbonización de las matrices de energía en todo el mundo. Además de los mercados tradicionales de fertilizantes, refinado y

otros usos (como gases industriales y hospitalares, entre otros), nuevos mercados para el hidrógeno verde pueden ser desarrollados en los segmentos de transporte, generación eléctrica, almacenamiento de energía y procesos industriales. Metas de neutralidad climática y de seguridad energética están llevando economías sólidas de países de Europa y Asia a lanzar inversiones importantes de incentivo a una transición energética basada en hidrógeno verde. Sin embargo, muchos de estos países no disponen del elevado potencial de energía renovable de Brasil, desfavoreciendo su producción local y abriendo un mercado prometedor para la exportación de ese producto en Brasil. Particularmente los estados del noreste brasileño poseen altos niveles de irradiación solar a lo largo del año, con una baja variabilidad interanual y decenal y estas condiciones pueden ser ideales para el desarrollo de plantas generadoras de hidrógeno verde. Sin embargo, la producción de hidrógeno verde a través de electrólisis de agua, requiere más de 18 litros de agua potable para producir un kilogramo de hidrógeno, considerando la situación actual de la tecnología. Esto representa un desafío en un estado en el que los recursos hídricos son escasos, exactamente en las localidades con los mayores niveles de irradiación solar. La Figura 6.3 presenta el esquema de producción del hidrógeno verde.

Figura 6.3 - Proceso productivo del hidrógeno verde, considerando la energía eléctrica procedente de fuentes renovables solar y eólica.



La rápida evolución de los sistemas de almacenamiento, como las baterías, el almacenamiento térmico o, en el futuro, el hidrógeno verde, se suma a las ventajas promovidas por la energía solar, ya que permitirá impulsar la descarbonización de sectores más difíciles, como el transporte y las industrias del cemento y del acero. En este sentido, la energía solar se presenta como la principal alternativa para un posicionamiento estratégico del país en el mercado del hidrógeno verde, que podría convertir a Brasil en uno de los países más competitivos del mundo en este producto en el largo plazo.

Energía solar y mitigación de emisiones

La generación de energía solar juega un papel importante en el paradigma del crecimiento económico moderno, sostenible y con bajo impacto ambiental. Como fuente libre de emisiones durante la generación eléctrica, la energía solar puede reducir las emisiones de CO₂ del sector de generación eléctrica, ya que cada MWh de energía generada con la fuente solar evita entre 534 y 1143 kg de CO₂ equivalente emitidos a la atmósfera en las centrales termoeléctricas alimentadas con combustibles fósiles.

La diversificación y electrificación de la matriz energética brasileña representa una oportunidad ambiental y económica si se lleva a cabo sobre bases predominantemente renovables. En este contexto, la energía solar se destaca entre las tecnologías bajas en carbono en al menos tres aspectos clave:

- competitividad económica, ya que actualmente es la forma más barata de generación de electricidad;
- por su escalabilidad, puesto que puede abastecer desde pequeños consumidores aislados hasta grandes plantas centralizadas;
- por su abundancia, pues el recurso solar está ampliamente distribuido a niveles económicamente viables por todo el territorio brasileño.

Tecnología, economía y generación de empleos

Según datos de la Asociación Brasileña de Energía Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), el uso de tecnologías de aprovechamiento de la energía solar ya generó más de 390.000 puestos de trabajo entre 2012 y 2020, siendo la mayor parte del segmento de generación distribuida, debido a la fuerte expansión de este sector. La generación de empleos directos se da principalmente en las actividades de instalación de sistemas fotovoltaicos, beneficiando principalmente al perfil de formados en instituciones de enseñanza media técnica y profesionalizante, como se ilustra en la [Figura 6.4](#). Los

empleos indirectos están asociados a la cadena del acero, aluminio, cobre y hormigón, como resultado de los materiales utilizados en las instalaciones.

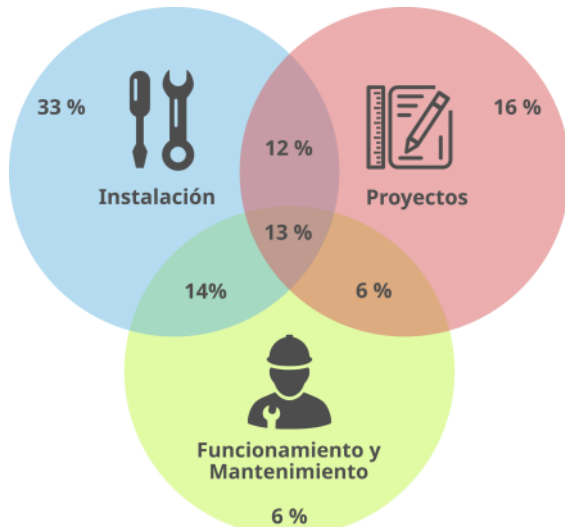


Figura 6.4 - Perfil de los empleos directos generados por el sector de la energía solar.

Fuente: ABSOLAR.

Variabilidad climática del potencial solar

Para el estudio de la variabilidad climática, se seleccionaron cuatro importantes ciudades representativas del Estado de Paraíba, como se muestra en la Figura 6.5.

El recurso solar se caracteriza por una alta variabilidad diaria debido al ciclo diurno y una moderada variabilidad intra-estacional. En el Estado de Paraíba, donde el promedio anual de irradiación global es de

5,71 kWh/m², los totales diarios pueden variar de 2,0 kWh/m² a 8,0 kWh/m², dependiendo de los sistemas meteorológicos actuantes. Por otro lado, el recurso solar presenta poca variabilidad a lo largo de los años para el Estado de Paraíba, de modo que la variación entre un año de mayor potencial y otro de menor potencial solar suele ser inferior al 5,0% alrededor del valor climático medio, como se muestra en la Figura 6.6. Esta variabilidad es menor que la variabilidad estacional observada en los diagramas de caja (box-plot). Estos datos demuestran la gran estabilidad interanual de la generación solar, comparando con otras fuentes renovables disponibles en la región, como eólica e hídrica. En cuanto a las tendencias, los escenarios climáticos futuros indican una ligera reducción (del 1% al 2%) del potencial solar en las mesorregiones de Sertão Paraibano, Borborema y Agreste Paraibano hasta mediados de siglo, aunque todavía existe una gran incertidumbre sobre estos impactos.

Al observar la variación de la irradiación solar en las cuatro localidades, se percibe

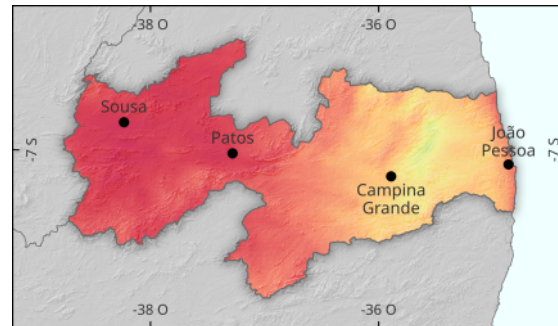


Figura 6.5 - Localidades representativas para las cuales se generaron gráficos de variabilidad: João Pessoa, Campina Grande, Patos y Sousa.

que el recurso de energía solar presentó una variación positiva en los años 2015 y 2016 para todas las localidades. Por otro lado, el recurso solar presentó valores por debajo de la media en las cuatro localidades en 2018, con una reducción de hasta el 3,5% con relación a la media del periodo de 10 años.

La Figura 6.7 muestra la variabilidad diaria para cada componente de la irradiación solar en Paraíba estimada por la desviación estándar (σ) de la irradiación diaria total a lo largo de los años. En principio, la desviación estándar puede ser útil para estimar qué tan diferentes son los días alrededor de la media (μ), de modo que $\mu \pm \sigma$ contiene el 68,2% de los días, $\mu \pm 2\sigma$ contiene el 95,6% de los días, y así sucesivamente, suponiendo distribuciones aproximadamente gaussianas.

En los mapas presentados se puede apreciar que la mayor variabilidad del GHI (más de 600 Wh/m²) tiene lugar en la porción suroeste de la región intermediaria de Campina Grande (cerca del municipio de Monteiro), además de en pequeñas porciones de las regiones intermedias de João Pessoa (cerca de la costa) y Patos. El DNI, por el contrario, muestra mayor variabilidad al noroeste de la región intermedia de Souza-Cajazeiras, alcanzando valores superiores a 800 Wh/m². La irradiación global en plano inclinado (GTI) presenta una variabilidad un 20% menor que la GHI, alcanzando valores máximos en el rango de 500 Wh/m². Por otro lado, la irradiación difusa horizontal DHI muestra baja variabilidad en todo el estado, con valores absolutos en el rango de 150 - 300 Wh/m².

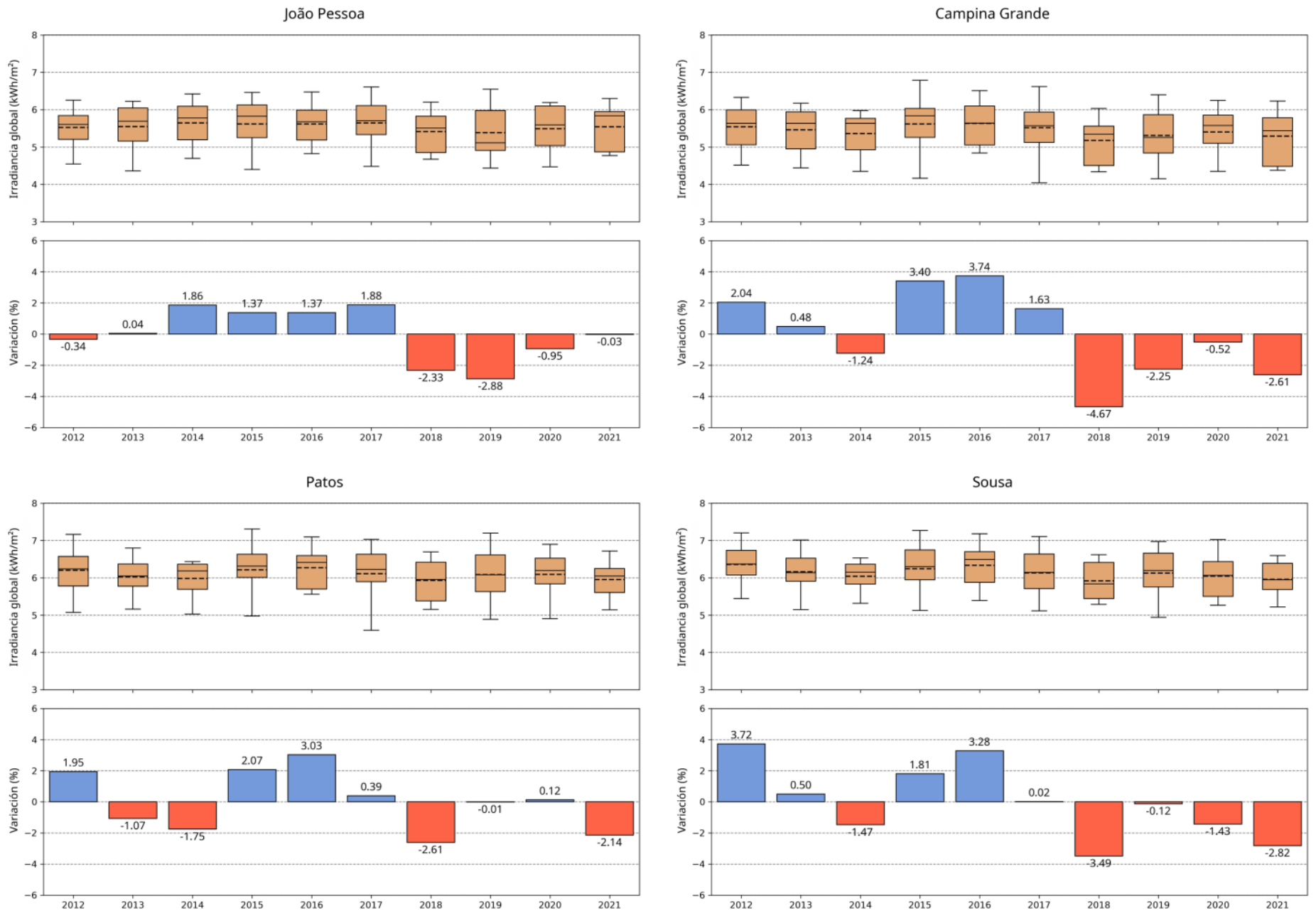


Figura 6.6 - Gráficos de variabilidad climática del recurso solar en cuatro localidades representativas: João Pessoa, Campina Grande, Patos y Sousa. El diagrama de caja (arriba) muestra la variabilidad estacional a través de la distribución de promedios mensuales a lo largo del año. El promedio anual está indicado como una línea discontinua. El gráfico de variación (abajo) muestra la variación de las medias anuales alrededor de la media de largo plazo (climática).

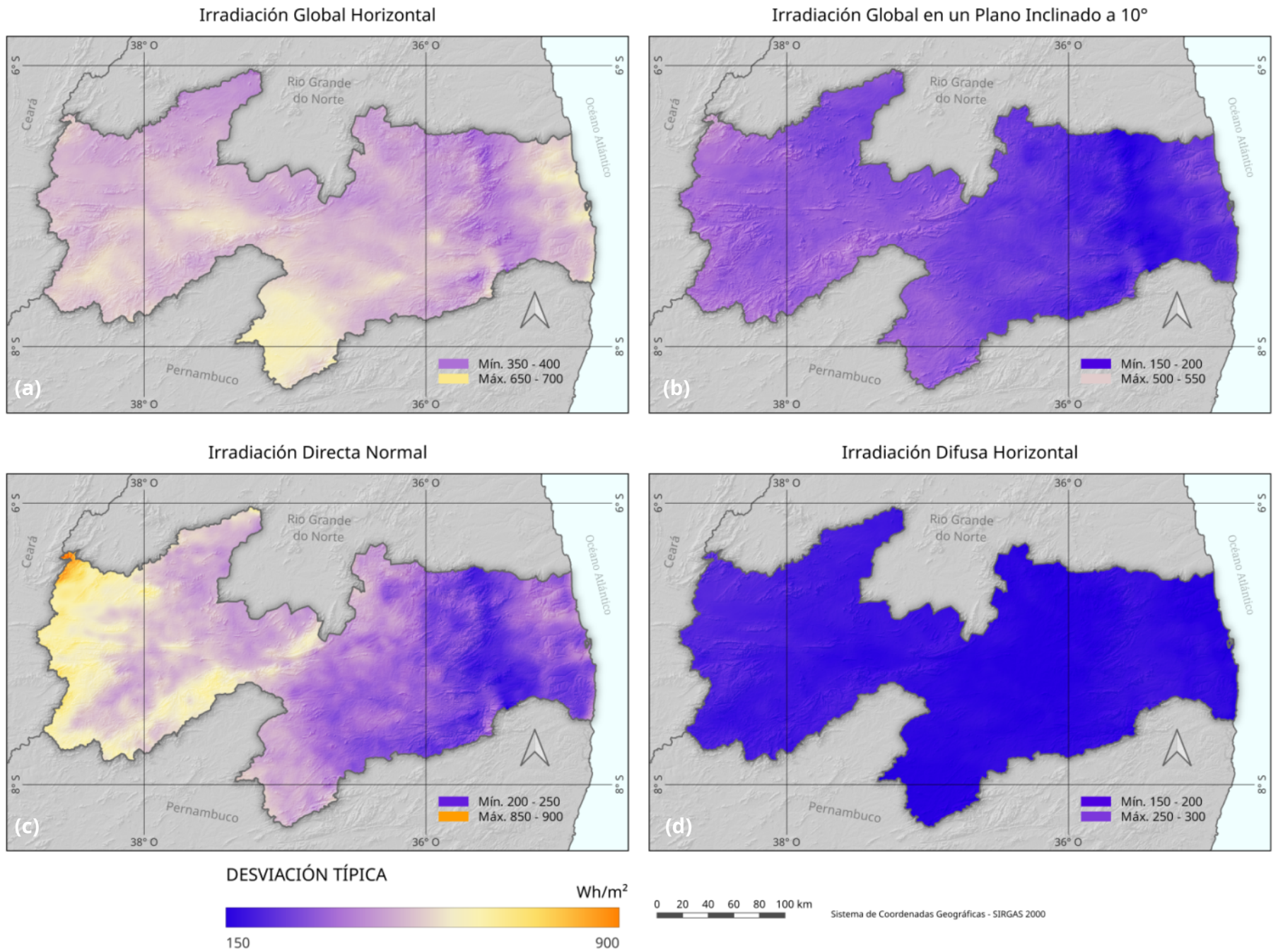


Figura 6.7 - Desviación estándar (σ) de la irradiación diaria total (a) horizontal global; (b) global en el plano inclinado; (c) directa normal y (d) difusa horizontal obtenidos durante los años 2012 a 2021.



CONSIDERACIONES FINALES

La crisis del petróleo de los años 70, con los altos precios impuestos por los países de la OPEP, mostró la fragilidad de los países por su gran dependencia de este recurso, lo que ha llevado desde entonces a buscar fuentes alternativas de petróleo que puedan satisfacer la demanda.

En décadas aún más recientes, el mundo se ha enfrentado a un nuevo paradigma aún más desafiante: la necesidad de encontrar fuentes de energía alternativas y renovables, no sólo por el precio y la dependencia de los combustibles fósiles, sino ahora por su combustión y la emisión de CO₂ a la atmósfera, que contribuye significativamente al aumento de las temperaturas globales y al cambio climático en el planeta.

En este contexto, la fuente solar, y especialmente la solar fotovoltaica, ha demostrado ser extremadamente fiable y un gran aliado en la lucha contra el cambio climático, con una capacidad mundial instalada que ha pasado en poco más de veinte años de 1 GWp en 1999 a más de 1 TWp.

La situación en Brasil no ha sido diferente. En los últimos 30 años, se han desarrollado importantes investigaciones y publicaciones que han sustentado y siguen contribuyendo a la aplicación de esta fuente en suelo brasileño, especialmente las desarrolladas por el INPE, como la publicación del Atlas Brasileño de Energía Solar, 1ª y 2ª ediciones, que ya indicaban el excelente potencial solar en todo Brasil, especialmente en la región nordeste.

El estado de Paraíba, perceptivo a estos cambios, ha dado otro paso importante en su rica historia al entregar a la sociedad el Atlas Solarimétrico de Paraíba y su Herramienta Web Interactiva para promover y difundir el uso de esta tecnología y contribuir así a una matriz energética más limpia y renovable. La Herramienta Interactiva permite realizar consultas y simulaciones para cualquier localidad del estado. El acceso a esta información permitirá una mayor asertividad en las inversiones a realizar en el estado, beneficiando al gobierno y a la sociedad con la generación de empleos e ingresos.





ANEXO - LEGISLACIÓN APLICADA AL SECTOR ENERGÉTICO

La legislación brasileña aplicada al sector energético viene evolucionando continuamente para atender las cuestiones que surgen debido a los avances científicos y tecnológicos y a los aspectos ambientales asociados al cambio climático, la preservación, conservación y recuperación del medio ambiente, con el objetivo de facilitar tanto el acceso a la energía como sus beneficios para la salud y la calidad de vida de la población brasileña.

Con relación al cumplimiento de la legislación ambiental, la Resolución CONAMA 237/1997 permite a los organismos ambientales establecer procedimientos simplificados para el otorgamiento de licencias ambientales a emprendimientos con poco potencial de impacto ambiental, y la Resolución CONAMA 279/2001 (y sus alteraciones) establece un procedimiento simplificado para el Licenciamiento ambiental de emprendimientos de bajo impacto ambiental, entre los cuales se encuentra la generación con recurso solar.

En las [Tablas A.1, A.2, A.3 e A.4](#) se presenta una breve relación de documentos que poseen carácter de regulación, normalización y orientación para instalaciones destinadas al aprovechamiento del recurso energético solar. Es importante señalar que este capítulo no pretende agotar la discusión sobre el tema, ya que la generación solar es un sector que está en continua evolución y con rápido crecimiento en su participación en la matriz energética brasileña.

La nota técnica “Legislación Ambiental de interés del sector eléctrico”, publicada por la Eletrobrás en septiembre de 2022, es una fuente importante de información que presenta un enfoque bastante completo del ordenamiento jurídico brasileño aplicado al sector de energía. Otra fuente importante de consulta es la Nota Técnica “Levantamiento de la legislación para licenciamiento ambiental de emprendimientos de generación de energía eléctrica por fuente solar” elaborada en colaboración entre Eletrobrás y EPE y publicada en mayo de 2022 (DGOA 017/2022

NT-EPE-DEA-SMA-019/2022). Ambos documentos están listados en las referencias bibliográficas del presente Atlas.

La [Tabla A.1](#) incluye las normas ABNT y la [Tabla A.2](#) las resoluciones ANEEL relacionadas con el manejo de energía eléctrica a partir de la fuente solar. Artículos técnicos y científicos que abordan los aspectos de la legislación técnica y ambiental ([Tabla A.3](#)), tanto en el ámbito nacional como regional, están disponibles para el acceso público y nuevos estudios deben seguirles en el futuro próximo, dado el crecimiento del sector y el interés que el tema presenta para los emprendedores, tomadores de decisión y para la sociedad civil como un todo (Hoffmann et al., 2019; Luna et al., 2019; Silva et al., 2019; Pereira, 2019; Viana e Basso, 2021; Severo et al., 2022). Por último, la [Tabla A.4](#) lista la legislación federal y estatal aplicable al sector.

Tabla A.1 - Normas dirigidas a plantas de generación de electricidad a partir de la fuente solar.

Documento	Fecha	Breve descripción
ABNT NBR 10.899/2020	18/08/2020	Crea normas para la terminología y especifica los términos técnicos relativos a los sistemas de conversión fotovoltaica de energía radiante solar en energía eléctrica.
ABNT NBR 16.690/2019	03/10/2019	Establece los requisitos de proyecto de las instalaciones eléctricas de sistemas fotovoltaicos, incluidas las disposiciones sobre los conductores, dispositivos de protección eléctrica, dispositivos de maniobra, toma de tierra y equi-potencialización del sistema fotovoltaico.
ABNT NBR 16.274/2014	06/04/2014 (en revisión)	Establece las informaciones y la documentación mínima que se debe recopilar tras la instalación de un sistema fotovoltaico conectado a la red. También describe la documentación, pruebas de puesta en servicio y criterios de inspección necesarios para evaluar la seguridad de la instalación y el correcto funcionamiento del sistema.

Tabla A.2 - Ordenanzas y resoluciones normativas dirigidas a la generación de energía eléctrica mediante fuente solar.

Documento	Fecha	Breve descripción
Resolución Normativa ANEEL nro. 1059/2023	07/02/2023	Perfecciona las reglas para la conexión y facturación de las plantas de microgeneración y minigeneración distribuidas en los sistemas de distribución eléctrica, así como las reglas del Sistema de Compensación de Energía Eléctrica; modifica las Resoluciones Normativas Nro. 920, de 23 de febrero de 2021, 956, de 7 de diciembre de 2021, 1.000, de 7 de diciembre de 2021, 1009, de 22 de marzo de 2022, y dicta otras disposiciones.
Ley nro. 14.300/2022	06/01/2022	Establece el marco legal para la microgeneración y minigeneración distribuida, el Sistema de Compensación de Energía Eléctrica (SCEE) y el Programa Social de Energías Renovables (PERS); modifica las Leyes Nro. 10.848, de 15 de marzo de 2004, y 9.427, de 26 de diciembre de 1996; y dicta otras disposiciones.
Ordenanza MME nro. 538/2015	15/12/2015	Crea el Programa de Desarrollo de la Generación Eléctrica Distribuida - ProGD, con los siguientes objetivos: I - promover la expansión de la generación distribuida de energía eléctrica, basada en fuentes renovables y cogeneración; II – incentivar la instalación de generación distribuida en: a) edificios públicos, como escuelas, universidades y hospitales; y b) edificios comerciales, industriales y residenciales.
Resolución Normativa ANEEL nro. 687/2015	24/11/2015	Modifica la Resolución Normativa Nro. 482, de 17 de abril de 2012, y los Módulos 1 y 3 de los Procedimientos de Distribución – PRODIST.
Resolución Normativa ANEEL nro. 482/2015	17/04/2012	Establece las condiciones generales para el acceso de la microgeneración y minigeneración distribuida a los sistemas de distribución de energía eléctrica, al sistema de compensación de energía eléctrica, y dicta otras disposiciones.

Tabla A.3 - Artículos técnicos y científicos que abordan la legislación técnica y ambiental en diversos contextos.

Documento	Fecha	Breve descripción
Nota Técnica Conjunta Eletrobrás /EPE DGOA 017/2022 NT-EPE-DEA-SMA-019/2022	12/2022	Levantamiento de la legislación sobre licencias ambientales para proyectos de generación de energía solar: situación en 2022.
Nota Técnica Solar Fotovoltaica Fluctuante EPE-DEE-NT-016/2020-r0	19/02/2020	Presentar la tecnología de sistemas solares flotantes, así como discutir sus potenciales ventajas y desafíos considerando las particularidades de Brasil. También se abordan aspectos socio-ambientales, legales y de competitividad.
Nota Técnica Ampliación de Generación Plantas eólicas-fotovoltaicas asociadas Consideraciones para el cálculo de la garantía física de energía EPE-DEE-NT-084/2020-r0	16/12/2020	El documento presenta una propuesta de metodología para estimar la Garantía Física de energía, con el objetivo de subsidiar la definición por parte del MME, para ser considerada en estos acuerdos innovadores.
Estudio de refinamiento de los mapas del área potencial de tejados de edificios residenciales en Brasil	2020	Propone una metodología para mapear el área potencial de tejado de edificios residenciales en Brasil para uso de energía fotovoltaica.
Nota Técnica Proyectos Fotovoltaicos en Subastas de Energía Características de los proyectos participantes en las subastas de 2013 a 2018 EPE-DEE-NT-091/2018-r0	17/10/2018	La nota tiene como objetivo difundir información sobre proyectos de esta fuente, discutiendo algunas tendencias y los aspectos más relevantes. El documento presenta aspectos de la calificación técnica y de los proyectos vendidos en las subastas A-4 de 2017 y 2018, además de análisis de la evolución de los proyectos a lo largo de los seis años de participación en las Subastas de Energía del Mercado Regulado.
NOTA TÉCNICA DEA/EPE 19/14 Inserción de la Generación Fotovoltaica Distribuida en Brasil - Condiciones e Impactos		Su objetivo es comprender la dinámica de la generación fotovoltaica distribuida en un horizonte de diez años, dadas diferentes condiciones. Para ello se establecieron objetivos específicos para componer el estudio: <ul style="list-style-type: none"> - Identificar los principales avances obtenidos y las posibles barreras; - aumentar el potencial técnico de la generación fotovoltaica residencial; - Impulsar la generación distribuida de fuente solar fotovoltaica a pequeña escala; - Identificar y evaluar, cualitativa y cuantitativamente, los impactos para los distintos agentes implicados.

Tabla A.4 - Leyes, decretos, ordenanzas y normas que regulan la actividad de generación de energía.

Documento	Fecha	Breve descripción
Ley Federal 14.300	06/01/2022	Establece el marco jurídico de la micro y minigeneración distribuida, el Sistema de Compensación Eléctrica (SCEE) y el Programa Social de Energías Renovables (PERS); modifica las Leyes 10.848, de 15 de marzo de 2004, y 9.427, de 26 de diciembre de 1996; y dicta otras disposiciones.
Decreto Federal 8.874/2016	13/10/2006	Regula las condiciones para la aprobación de proyectos de inversión considerados prioritarios en el área de infraestructura o producción económica intensiva en investigación, desarrollo e innovación, a los efectos del artículo 2 de la Ley 12.431/2011, y deroga el Decreto 7.603/2011. Decreto 7.603/2011. Se consideran proyectos prioritarios aquellos que aporten beneficios ambientales o sociales significativos, como los proyectos basados en tecnologías renovables de generación de tecnologías de generación.
Ordenanza Ibama 78/2021	13/01/2021	Establece parámetros de sensibilidad ambiental (Anexos IV.A a IV.O) y clasificación de riesgo de las actividades económicas asociadas a actos de liberación bajo responsabilidad del Ibama (licenciamiento ambiental federal) relacionados con: sistemas de transmisión de energía eléctrica (Anexo IV.D); generación a partir de energía solar (Anexo IV.G); en tierras indígenas (Anexo IX.L); supresión de vegetación y captura, recolección, manejo y transporte de fauna (Anexo IV.O).
Ordenanza MMA 326/2020	24/07/2020	Establece el Programa Agenda Ambiental en la Administración Pública - Programa A3P y establece sus lineamientos. El Programa A3P tiene como objetivo promover la responsabilidad socio-ambiental, la adopción de procedimientos de sostenibilidad y criterios socio-ambientales en las actividades del sector público, incluido el uso de energía solar cuando implique en ahorro energético y produzca poco o ningún impacto ambiental (Art. 2, I, II, IV, V y VI).
Norma Administrativa SUDEMA 101/2017 (Estado da Paraíba)	11/04/2017	Exención de licencia ambiental en el estado de Paraíba para actividades que se califiquen como de micro o pequeño tamaño y con pequeño potencial contaminante, incluida la microgeneración solar fotovoltaica, según se define en la Nota Técnica Conjunta Eletrobrás/EPE - NT Eletrobrás DGOA 003/2021 / NT-EPE-DEA-SMA-006-2021 Clasificación: Público 30.



ÍNDICE DE FIGURAS, CUADROS Y TABLAS

Figura 1.1		Figura 1.11		Figura 2.6	
<i>Mapa de la División Urbana Regional</i>	4	<i>Porcentaje de energía solar fotovoltaica por clase de consumo</i>	20	<i>Respuestas espectrales relativas de una célula solar Sc-Si y un piranómetro de termopila</i>	28
Figura 1.2		Figura 1.12		Figura 2.7	
<i>Topografía</i>	5	<i>Porcentaje de fuentes renovables en la matriz energética</i>	20	<i>Ejemplos de procesos para medir la radiación solar directa</i>	28
Figura 1.3		Figura 1.13		Figura 2.8	
<i>Mapa de inclinación del terreno</i>	7	<i>Sistema eléctrico</i>	22	<i>Plataformas de recogida de datos solarimétricos</i>	29
Figura 1.4		Figura 2.1		Figura 2.9	
<i>Mapa de precipitaciones</i>	8	<i>Movimiento de la Tierra alrededor del Sol</i>	24	<i>Ilustración del efecto fotovoltaico en una célula fotovoltaica</i>	30
Figura 1.5		Figura 2.2		Figura 2.10	
<i>Mapa de tipos de clima</i>	11	<i>Principales ángulos que definen la posición del Sol en la bóveda celeste</i>	25	<i>Sistemas de generación heliotérmica</i>	31
Figura 1.6		Figura 2.3		Figura 3.1	
<i>Mapa de las temperaturas diurnas</i>	12	<i>Ángulo de declinación (δ)</i>	25	<i>Esquema de la metodología utilizada en el Atlas Solarimétrico</i>	33
Figura 1.7		Figura 2.4		Figura 3.2	
<i>Mapa de los recursos hídricos</i>	14	<i>Espectro de la radiación solar incidente</i>	26	<i>Imágenes del canal visible de los satélites GOES 13 y GOES 16</i>	35
Figura 1.8		Figura 2.5		Figura 3.3	
<i>Unidades de Conservación, Tierras Indígenas y Quilombolas</i>	17	<i>Componentes de la radiación solar incidente</i>	26	<i>Mapas de relieve y biomas utilizados en el modelo BRASIL-SR</i>	36
Figura 1.9					
<i>Mapa de la densidad de población</i>	18				
Figura 1.10					
<i>Evolución de Producto Interno Bruto (PIB)</i>	19				

Figura 3.4 <i>La zona utilizada para configurar el modelo BRASIL-SR y la ubicación de las estaciones de superficie</i> 37	Figura 6.7 <i>Mapas de desviación estándar</i> 62	Tabla 3.1 <i>Frecuencia temporal de recogida de imágenes en el período considerado para el Atlas Solarimétrico</i> 35
Figura 3.5 <i>Diagrama de flujo del proceso de cualificación</i> 40	Qd. Diagrama de dispersión 41	Tabla 3.2 <i>Porcentaje de datos aprobados tras el proceso de cualificación</i> 39
Figura 3.6 <i>Diferencias de bias entre las bases solarimétricas de Brasil-2017 y Paraíba-2023</i> 43	Qd. Estaciones solarimétricas <i>BSRN, EPE, INMET estándares</i> 38	Tabla 3.3 <i>Métricas de validación de los resultados de los modelos para los totales diarios de irradiación global horizontal</i> 41
Figura 5.1 <i>Instalaciones fotovoltaicas en viviendas, industrias o edificios y en zonas rurales</i> 56	Qd. Incertidumbres 29	Tabla 3.4 <i>Métricas de validación de los resultados del modelo para la irradiación directa normal</i> 41
Figura 6.1 <i>Sistema de calentamiento de agua doméstico de bajo coste</i> 57	Qd. Potencial de generación fotovoltaica 55	Tabla 3.5 <i>Diferencias entre las bases de datos del Atlas Solarimétrico de Paraíba y del Atlas Brasileño de Energía Solar</i> 42
Figura 6.2 <i>Diagrama de complementariedades entre fuentes renovables y escalas de variabilidad</i> 58	Qd. Satélites geoestacionarios <i>Cobertura de la serie GOES, Órbita</i> 34	Tabla A.1 <i>Normas para centrales solares</i> 65
Figura 6.3 <i>Proceso de producción de hidrógeno verde</i> 59	Qd. Plantas fotovoltaicas <i>Coremas (a), (b), (c) e (d)</i> 23	Tabla A.2 <i>Ordenanzas y resoluciones reguladoras de la generación de electricidad solar</i> 65
Figura 6.4 <i>Perfil de los empleos directos generados por el sector de la energía solar</i> 60	Qd. Vegetación <i>Caatinga, cacto quipá en el Cariri, costa paraibana, manglares, selva atlántica, meseta de Borborema</i> 9	Tabla A.3 <i>Artículos técnicos y científicos sobre legislación técnica y medioambiental</i> 66
Figura 6.5 <i>Lugares representativos utilizados en los gráficos de variabilidad</i> 60	Tabla 1.1 <i>Unidades de conservación</i> 15, 16	Tabla A.4 <i>Leyes, decretos, ordenanzas y normas que regulan las actividades de generación de energía</i> 67
Figura 6.6 <i>Gráficos de la variabilidad climática del recurso solar</i> 61	Tabla 1.2 <i>Tierras indígenas</i> 19	
	Tabla 1.3 <i>Tierras de Quilombola</i> 19	
	Tabla 1.4 <i>Principales plantas de generación fotovoltaica en funcionamiento</i> 21	
	Tabla 2.1 <i>Principales procesos físicos utilizados para registrar la radiación solar</i> 27	
	Tabla 2.2 <i>Importancia relativa de las etapas de instalación, funcionamiento y mantenimiento de una estación solarimétrica</i> 30	



REFERENCIAS

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 em Internet 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 em Internet em <https://dados.ana.gov.br/dataset/>.
Accedido em Dezembro 2022.

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2021. BDGD - Base de Dados Geográfica da Distribuidora conforme PRODIST, "Módulo 10 - Sistema de Informação Geográfica Regulatório", 2021. Disponível em Internet em ftp://ftp.ane-el.gov.br/srd/LAI/BDGD_LAI (previa solicitud de acceso - datos abiertos).
Accedido em Dezembro de 2022.

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Sistema de Informações de Geração (SIGA). Disponível em Internet em [https://app.powerbi.com/view?](https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjo1Njc4OGYyYjQtYWYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9)

[r=eyJrIjo1Njc4OGYyYjQtYWYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9](https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjo1Njc4OGYyYjQtYWYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9).
Accedido em Enero de 2023.

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Geração distribuída. <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjo1Njc4OGYyYjQtYWYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>.
Accedido em Enero 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/>.
Accedido 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 em Internet em <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html>.
Accedido 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 em Internet em <https://mapaeolico.pb.gov.br/>.
Accedido em Dezembro de 2022.

Balanco Energético Nacional - BEN 2022: Ano base 2021. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em Internet em <https://>

- www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf. Accedido en Diciembre 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. Disponible en Internet en <https://www legisweb.com.br/legislacao/?id=95982>. Accedido en Diciembre 2022.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução nº 275 de 25/04/2001. Disponible en Internet en <https://www legisweb.com.br/legislacao/?id=97507>. Accedido en Diciembre 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&>.
- CRIA - Centro de Referência e Informação Ambiental. 2023. Specieslink - simple search. Disponible en <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. Disponible en Internet en <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). Disponible en <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-products-overview>.
- ELETROBRAS, EPE. Nota Técnica Conjunta Eletrobrás/EPE - Levantamento da legislação para licenciamento ambiental de empreendimentos de geração de energia elétrica por fonte solar. NT Eletrobrás DGOA 003/2021. NT-EPE-DEASMA-006-2021. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 85p., 2021.
- ELETROBRAS. Legislação Ambiental de interesse do setor elétrico. Rio de Janeiro, Eletrobrás, 459p. 2022.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Dados georreferenciados de linhas de transmissão. WebMap EPE. Accedido en junho/2023. Disponible en <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. N° EPE-DEE-RE-065/2013-r6_UFV. 2013. Disponible en 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. Disponible en <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. Disponible en Internet en <https://www.gov.br/funai/pt-br/atuacao/terras-indigenas/geoprocessamento-e-mapas/>. Accedido en Diciembre 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. Disponible en Internet en 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/. Accedido en Diciembre de 2022.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Centro de Documentação e Disseminação de Informações / Coordenação de Projetos Especiais. *Grade Estatística - 2016*. Disponible en Internet em ftp://geoftp.ibge.gov.br/recortes_para_fins_estatisticos/grade_estatistica/censo_2010/. Accedido en Diciembre 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 en Diciembre de 2022.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. População estimada em 2021. Diretoria de Pesquisas (DPE) / Coordenação de População e Indicadores Sociais (COPIIS). Disponible en Internet en <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6579>. Accedido en Diciembre 2022.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Produção Agrícola - Lavoura temporária. Informações disponíveis online en <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/pesquisa/14/10193>. Consulta en Diciembre de 2022.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Produto Interno Bruto dos Municípios. Disponible en Internet en <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9088-produto-interno-bruto-dos-municipios.html>. Accedido en Diciembre 2022.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Produto Interno Bruto dos Municípios. Informações disponíveis online en <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9088-produto-interno-bruto-dos-municipios.html?t=series-historicas&c=3548500>. Consulta en Diciembre de 2022.
- Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - ICMBIO. Ministério do Meio Ambiente - MMA. Disponible en Internet en <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/servicos/geoprocessamento/mapa-tematico-e-dados-geoestatisticos-das-unidades-de-conservacao-federais/>. Accedido en Diciembre 2022.
- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA. Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil. Plataforma Digital. Disponible en Internet en <http://www.atlasbrasil.org.br/acervo/atlas>. Accedido en Diciembre de 2022.

- Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE. Banco de Dados de Imagens (DISSM). Disponível em Internet em <http://satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes16.formulario.logic>. Acessado em Dezembro de 2022.
- Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE. Base de dados da Rede SONDA. Disponível em Internet 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 em Internet 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 em Internet 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 em Internet 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 em Internet em <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acessado em Dezembro 2022.
- International Organization for Standardization - ISO. Normas para medição de irradiância. Disponível em Internet 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 dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 17, 1-10, 2002.
- Molion, L. C. B.; Bernardo, S. O. Dinâmica 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 em Internet 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. Disponible en Internet en <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



Haga clic y acceda al
Atlas Solarimétrico de Paraíba