ATLAS DE ENERGIA SOLAR
do Estado do Paraná

Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná

UTFPR
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

INPE
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

ITAIPU
BINACIONAL

PTI
Parque Tecnológico Itaipu

LABREN
Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia

LABENS
Laboratório de Energia Solar

CIH
Centro Internacional de Hidroinformática

Atlas de Energia Solar
do Estado do Paraná

Autores

Gerson Máximo Tiepolo
Enio Bueno Pereira
Jair Urbanetz Junior
Silvia Vitorino Pereira
André Rodrigues Gonçalves
Francisco José Lopes de Lima
Rodrigo Santos Costa
Alisson Rodrigues Alves

Realização

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Parque Tecnológico Itaipu - PTI
ITAIPU Binacional (Patrocinadora)

Curitiba - Paraná - Brasil
1ª Edição - 2017

Equipes envolvidas no Projeto do Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Curitiba

Laboratório de Energia Solar - LABENS

Coordenação do Projeto:
Gerson Máximo Tiepolo

Coordenação LABENS:
Jair Urbanetz Junior
Gerson Máximo Tiepolo

Equipe de trabalho:
Gerson Máximo Tiepolo
Jair Urbanetz Junior
Lucas César Lourenço de Moraes
João Nicolau Gaio
Juliana D'Angela Mariano

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Centro de Ciência do Sistema Terrestre - CCST
Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia - LABREN

Coordenação LABREN:
Enio Bueno Pereira

Equipe de trabalho:
Enio Bueno Pereira
Silvia Vitorino Pereira
André Rodrigues Gonçalves
Francisco José Lopes de Lima
Rodrigo Santos Costa
Jefferson Gonçalves de Souza
Fernando Ramos Martins (*)
Marcelo Pizutti Pes
Rafael Carvalho Chagas
Venize Assunção Teixeira

(*) Universidade Federal de São Paulo - Campus Baixada Santista

Parque Tecnológico Itaipu

Centro Internacional de Hidroinformática - CIH

Coordenação CIH:
Nara Nami

Equipe de Trabalho:
Alisson Rodrigues Alves
Jefferson Luiz Gonçalves Silva
Newmar Wegner
Marcos André Ferreira dos Santos
Fagner Bittencourt de Oliveira
Milena Cornelio Olivi
Willbur Rogers de Souza
Rafael Gonzalez
Kelvyn Ferreira de Melo

Edição

Projeto gráfico, edição e arte final:
Silvia Vitorino Pereira

Capa:
Francieli Padilha Bras Costa
Henrique Nunes Cordoni

At65 Atlas de energia solar do Estado do Paraná / Gerson Máximo Tiepolo, Enio Bueno Pereira, Jair Urbanetz Junior, Silvia Vitorino Pereira, André Rodrigues Gonçalves, Francisco José Lopes de Lima, Rodrigo Santos Costa, Alisson Rodrigues Alves.
-- Curitiba: INPE, 2017.
107p.: il.

ISBN: 978-85-17-00091-1

1. Energia 2. Energia Renovável 3. Energia Solar 4. Radiação Solar 5. Potencial Fotovoltaico. I. Tiepolo, Gerson Máximo; II. Pereira, Enio Bueno; III. Urbanetz Junior, Jair; IV. Pereira, Silvia Vitorino; V. Gonçalves, André Rodrigues; VI. Lima, Francisco José Lopes; VII. Costa, Rodrigo Santos; VIII. Alves, Alisson Rodrigues.

CDU: R084.4:620.91(816.2)

ÍNDICE

APRESENTAÇÃO 6

PREFÁCIOS 7

ENERGIA ELÉTRICA E PROJEÇÕES 10

ENERGIA SOLAR E REGULAMENTAÇÃO 13

GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NO ESTADO DO PARANÁ 16

REGULAMENTAÇÃO PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA (GD) NO BRASIL 17

TRIBUTAÇÃO SOBRE A ENERGIA ELÉTRICA COMPENSADA 18

ESTADO DO PARANÁ 19

METODOLOGIA 22

DESCRIÇÃO DO MODELO PARA ESTIMAR A IRRADIAÇÃO SOLAR 22

BASE DE DADOS PARA VALIDAÇÃO DAS ESTIMATIVAS 23

PROCESSO DE VALIDAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DO MODELO 25

VALIDAÇÃO DA IRRADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL 26

VALIDAÇÃO DA IRRADIAÇÃO DIRETA NORMAL 27

MAPAS DE IRRADIAÇÃO E DE PRODUTIVIDADE 33

PRODUTIVIDADE ESTIMADA EM SFVCR 34

ESCALA ADOTADA 34

LEITURA DOS MAPAS 35

MAPAS DE IRRADIAÇÃO 36

MAPAS DE IRRADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE 44

VARIABILIDADE INTERANUAL E TENDÊNCIAS 68

VARIABILIDADE INTERANUAL 68

TENDÊNCIAS POR MESORREGIÃO 69

ANÁLISE DOS MAPAS GERADOS 74

IRRADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL 74

IRRADIAÇÃO DIRETA NORMAL 74

IRRADIAÇÃO DIFUSA 75

IRRADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE NO PLANO INLCINADO NA LATITUDE 75

COMPARAÇÃO ENTRE POTENCIAIS SOLARES 78

SISTEMA ELÉTRICO E DISTRIBUIÇÃO DA IRRADIAÇÃO 81

CONSIDERAÇÕES FINAIS 83

AGRADECIMENTOS 86

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO 87

LISTA DE FIGURAS 91

LISTA DE TABELAS 93

ANEXO A 94

APRESENTAÇÃO

A Itaipu Binacional, maior geradora de energia limpa e renovável do planeta, vem se consolidando como vetor de propulsão do desenvolvimento regional sustentável, em observância a fatores econômicos, sociais e ambientais. Ao mesmo passo, este papel evidencia-se em razão das alianças estabelecidas com instituições que vislumbram que o caminho para este desenvolvimento passa por trabalhos cooperados e sinérgicos.

É neste contexto que agora é apresentado o Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná, resultado de parcerias entre a Assessoria de Energias Renováveis de Itaipu e do Parque Tecnológico Itaipu (PTI), promotores de ambientes de inovação favoráveis à geração de energia a partir de fontes renováveis na região, com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), organismos referência na pesquisa territorial e energética.

Merece importante destaque nesse trabalho o Centro Internacional de Hidroinformática, um Centro de Categoria 2 do Programa Hidrológico Internacional da Unesco, ligado ao PTI, que atua diretamente na prospecção energética no território por meio de técnicas e ferramentas de geoprocessamento. Foi este Centro que conduziu, em parceria com UTFPR e INPE, a realização destes estudos.

A publicação traz informações sobre o potencial de energia solar do Estado, demonstrando o grande potencial que o Paraná possui para aproveitamento dessa fonte e a realização de investimentos que permitam a sua utilização. O conteúdo expõe informações sobre a regulamentação acerca dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFVCR), possibilitando também ao cidadão paranaense obter informações sobre esse tipo de aproveitamento energético no Estado.

No estudo, os pesquisadores utilizaram modelos para estimar a quantidade de irradiação que chega ao solo, realizando análises comprobatórias dessas informações. O Atlas mostra dados em escala estadual de quatro componentes de irradiação (difusa, global, inclinada e direta normal), validados com estações Sonda e INMET, referências nacionais em monitoramento da irradiação solar.

Em síntese, o Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná apresenta informações sobre energia solar de forma regionalizada e espacializada, caracterizando-se como um rico instrumento para estudos acadêmicos, teses de investimento e análises territoriais que impulsionam o debate e a adoção de políticas públicas para a disseminação e o aumento da utilização da energia solar no Paraná.

Luiz Fernando Leone Vianna
Diretor-Geral Brasileiro da Itaipu Binacional

PREFÁCIOS

Dispor de fontes seguras e confiáveis de energia sempre foi considerado um fator determinante no desenvolvimento de países e regiões. Por sua própria natureza, o Paraná não se configura como uma exceção à essa premissa e a sua posição como principal estado produtor de energia no país explica em muito as referências que se fazem ao nosso estado quando se buscam exemplos de desenvolvimento.

Muito dessa condição se deve à Itaipu, é evidente. Maior produtora de energia limpa e sustentável do mundo, a localização de Itaipu no extremo oeste paranaense incorpora, desde a sua construção, números impressionantes à produção paranaense.

Porém, muito além de sua missão de assegurar potência aos sistemas brasileiro e paraguaio, Itaipu tem-se constituído num efetivo instrumento de desenvolvimento dos territórios adjacentes às margens da bacia sobre sua influência, apoiando por meio de suas iniciativas o crescimento dessas regiões sob um enfoque abrangente e, principalmente, sustentável.

Apoio fundamental nesse sentido tem sido trazido pelo PTI, o Parque Tecnológico de Itaipu, que através dos seus centros de pesquisa e desenvolvimento impulsiona e expande os limites do conhecimento em áreas cujo interesse de Itaipu e da sociedade se manifesta.

Energias renováveis representam uma dessas novas fronteiras. Influenciada principalmente pela expansão da produção agrícola, onde a região oeste tem liderado a mobilização em busca de novas e sustentáveis maneiras de produzir energia, de forma confiável e acessível, como estratégia para agregar valor e fortalecer a competitividade de seus produtos.

A elaboração deste Atlas é um dos importantes marcos nessa trajetória. Pelo trabalho do Centro Internacional de Hidroinformática - CIH, vinculado ao PTI, e com o apoio da Superintendência de Energias Renováveis da Itaipu Binacional, a proposta trazida pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR prosperou e, ainda com a participação do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, tornou-se essa obra cujos resultados deverão trazer contribuição significativa à expansão da geração de energia por meio de sistemas fotovoltaicos.

Sem dúvida, esse grande modelo de colaboração construído por essas instituições, mostra-nos o quanto as parcerias nos permitem ir muito além dos nossos próprios limites.

A obra reúne uma série de mapas sobre a irradiação solar no território paranaense, cuja utilização irá servir a diferentes propósitos, com ênfase na geração de energia elétrica por meio de sistemas fotovoltaicos, trazendo maior confiabilidade e precisão no dimensionamento de projetos e nos investimentos.

Nossa expectativa é que sua utilidade se confirme e possa apoiar o Paraná na sua exitosa trajetória de desenvolvimento. A energia solar fotovoltaica é uma das modalidades que mais tem se desenvolvido no mundo, gerando novas oportunidades de

negócios, ampliando a oferta de trabalho e reduzindo a utilização de outras fontes não renováveis.

E pelos dados demonstrados, mais uma vez o Paraná deve agradecer à sua generosa natureza, pois o sol nos brinda aqui com potencial superior a países ou regiões cuja utilização da energia solar tem se mostrado viável e com resultados muito expressivos.

Paulo Afonso Schmidt
Assessor de Energias Renováveis da ITAIPU Binacional

Diversificar as fontes de energia e apostar nas energias renováveis não é mais uma tendência mundial, é uma necessidade. E, infelizmente, ainda temos o que avançar. Em uma área de 199.880 km², distribuída em 399 municípios, quase 93% da energia consumida no Paraná é proveniente das usinas hidrelétricas.

O Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná, desenvolvido pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em parceria com o Centro Internacional de Hidroinformática do Parque Tecnológico Itaipu (PTI) e com a Itaipu Binacional, comprova o potencial que o Estado possui para as fontes renováveis de energia, neste caso, a energia solar. O valor de produtividade do Paraná é superior, por exemplo, ao da Alemanha, um dos países que mais utiliza a energia fotovoltaica.

Os dados desse levantamento poderão ser acessados na internet por qualquer cidadão e a intenção é que as informações possam ser usadas em pesquisas e para o embasamento da elaboração de políticas públicas de incentivo à ampliação do uso dessa fonte de energia renovável no Paraná.

As energias renováveis são a grande prioridade do Parque Tecnológico Itaipu. Temos a intenção de transformar a região Oeste do Paraná em um grande polo internacional da cadeia produtiva das energias renováveis. Nesse sentido, atualmente já atuamos com o biogás, lançamos agora o Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná, e pretendemos incluir novas fontes para fortalecer esse trabalho. Este material é mais um passo do nosso caminho em direção a ser um grande vetor em tecnologias sustentáveis.

Ramiro Wahrhaftig
Diretor Superintendente PTI

O Estado do Paraná representa o berço de grandes desafios, de uma terra produtiva e de um povo trabalhador, que o tornou referência nacional em diversas atividades, como na agroindústria e na produção de energia elétrica o qual é o grande gerador neste país de dimensões continentais, onde está instalada a Usina Hidrelétrica de Itaipu, a maior produtora de energia elétrica do planeta.

Mais do que uma usina hidrelétrica, Itaipu representa o desenvolvimento em diversos segmentos da sociedade pois, por meio do Parque Tecnológico Itaipu, desenvolve importantes pesquisas, muitas delas em conjunto com outras instituições, cuja visão sistêmica permite a geração de conhecimento em prol da sociedade nas mais diversas áreas.

Perceptivos à necessidade da sociedade paranaense quanto à perspectiva de utilizar energia solar como importante fonte geradora de energia, a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), instituição com mais de 100 anos de existência e referência no estado em ensino, pesquisa e extensão, em parceria com a Itaipu Binacional, Parque Tecnológico Itaipu e o Instituto

Nacional de Pesquisas Espaciais, referência internacional e que atua na vanguarda da ciência e tecnologia espacial com grande expertise em modelamento, coleta e interpretação de dados espaciais diversos, propuseram uma parceria inédita para a realização de um trabalho desafiador: o de mapear, analisar e apresentar a distribuição da radiação solar e do potencial de geração de energia elétrica por meio de sistemas fotovoltaicos no Estado do Paraná.

Foi com este espírito inovador que estas instituições entregam para a sociedade paranaense o Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná.

O projeto, sob a coordenação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Curitiba, por meio do Grupo de Pesquisa em Energia Solar e Sistemas Fotovoltaicos e do Laboratório de Energia Solar (UTFPR/LABENS), tem como objetivo, ser uma ferramenta de consulta e análise do potencial de radiação solar e da geração de energia elétrica fotovoltaica no estado, de forma a promover e disseminar o uso desta tecnologia em prol do desenvolvimento sustentável.

A obtenção e disponibilização de informações sobre a irradiação solar e a produtividade estimada em sistemas fotovoltaicos, de forma mais precisa, permitirá maior assertividade quanto à investimentos na área de energia solar por toda a sociedade paranaense, do pequeno ao grande investidor, possibilitando, ainda, que importantes pesquisas sejam desenvolvidas nas variadas áreas que utilizam desta fonte renovável de energia.

Os produtos gerados neste Atlas vão desde uma análise quanto à geração de energia elétrica e potencial de energia solar, que apontam para a necessidade de se diversificar a matriz energética, até a apresentação de mapas das diversas componentes da irradiação solar e a interpretação dos valores obtidos.

Os produtos voltados à energia solar no Paraná foram desenvolvidos pelo INPE por meio do Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia do Centro de Ciência do Sistema Terrestre (INPE/CCST/LABREN) com o apoio da UTFPR/LABENS, atuando na validação e interpretação dos dados, fazendo uso do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR e das informações obtidas para o Estado do Paraná no âmbito do projeto do Atlas Brasileiro de Energia Solar - 2ª edição.

Ao todo foram gerados neste Atlas 174 mapas sobre irradiação solar, agrupados e apresentados em 30 páginas.

O Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná está organizado em 10 partes distintas: a primeira traz uma reflexão sobre a geração e demanda de energia elétrica; a segunda parte aporta informações sobre energia solar, projeções de inserção na matriz elétrica e regulamentações do setor; a terceira apresenta informações sobre o Estado do Paraná e algumas das suas principais características; a quarta parte descreve a metodologia para estimação da irradiação e o processo de validação; a quinta apresenta todos os mapas de irradiação produzidos; a sexta parte analisa a variabilidade e tendências da irradiação no Paraná; a sétima faz uma investigação detalhada dos valores de irradiação e produtividade encontrados; a oitava compara o potencial apresentado no Paraná com o potencial da Europa; a nona traz uma representação do sistema elétrico no Paraná associado ao mapa de irradiação no plano inclinado e, finalmente, a décima parte apresenta as considerações finais do projeto.

Prof. Dr. Gerson Máximo Tiepolo
Coordenador do Projeto

Prof. Dr. Enio Bueno Pereira
Coordenador do LABREN

ENERGIA ELÉTRICA E PROJEÇÕES

A busca pelo equilíbrio entre os pilares social, econômico e ambiental, base para o desenvolvimento sustentável [1], tem sido o grande desafio para a sociedade atual.

O acordo firmado em Paris em dezembro de 2015 durante a Conferência do Clima (COP21) e confirmado em abril de 2016, que rege medidas de redução dos gases causadores do efeito estufa para diminuir o aquecimento global, contribui para o desenvolvimento da sociedade de forma sustentável, cujo alicerce está pautado no "desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras em satisfazer suas próprias necessidades".

O alcance destas medidas tem se tornado o grande desafio dos governantes em como continuar a promover o desenvolvimento da sociedade e, ao mesmo tempo, atender às premissas que norteiam o desenvolvimento sustentável.

Nas próximas décadas estão previstos, de forma global, aumentos significativos da renda per capita [2], o que deve influenciar em um maior consumo de fontes energéticas devido à melhoria da qualidade de vida e ao maior poder aquisitivo da população, necessitando a sociedade de políticas públicas e estratégias de investimentos adequadas na área de energia, em destaque para a energia elétrica [3].

Historicamente, no Brasil a principal fonte geradora de energia elétrica tem sido de origem hídrica. Entretanto nos últimos anos, principalmente a partir de 2012, devido à escassez de chuva em diversas regiões do país, a participação da fonte hidráulica na geração de energia elétrica tem diminuído sucessivamente, enquanto houve um aumento significativo na participação da fonte térmica a combustíveis fósseis na geração de energia elétrica.

Quanto às renováveis não-hídricas, a que tem apresentado maior participação na matriz elétrica brasileira tem sido a biomassa, seguida da eólica, sendo a solar ainda pouco expressiva, conforme apresentado na Figura 1.

Apesar do crescimento de fontes renováveis não-hídricas na geração de energia elétrica, estas ainda têm sido insuficientes para compensar a menor participação que a fonte hídrica tem apresentado nos últimos anos na matriz elétrica brasileira.

Em relação à matriz elétrica global, a energia elétrica é predominantemente gerada através de combustíveis fósseis e nuclear, com diminuição da sua participação nos últimos anos, e a forte tendência de crescimento das fontes renováveis de energia. A participação das fontes renováveis e das não renováveis na matriz elétrica brasileira e global são apresentadas na Figura 2.

A diminuição da geração de energia elétrica por fonte hídrica no Brasil está associada principalmente à escassez de chuvas, o que ocasiona maior despacho das usinas térmicas movidas a combustíveis fósseis. Esta diminuição também está relacionada à dificuldade da expansão desta fonte na matriz elétrica brasileira em virtude das pressões ambientais e sociais para a construção de

novas usinas, cujo potencial restante a ser explorado encontra-se quase que exclusivamente na região Norte do Brasil.

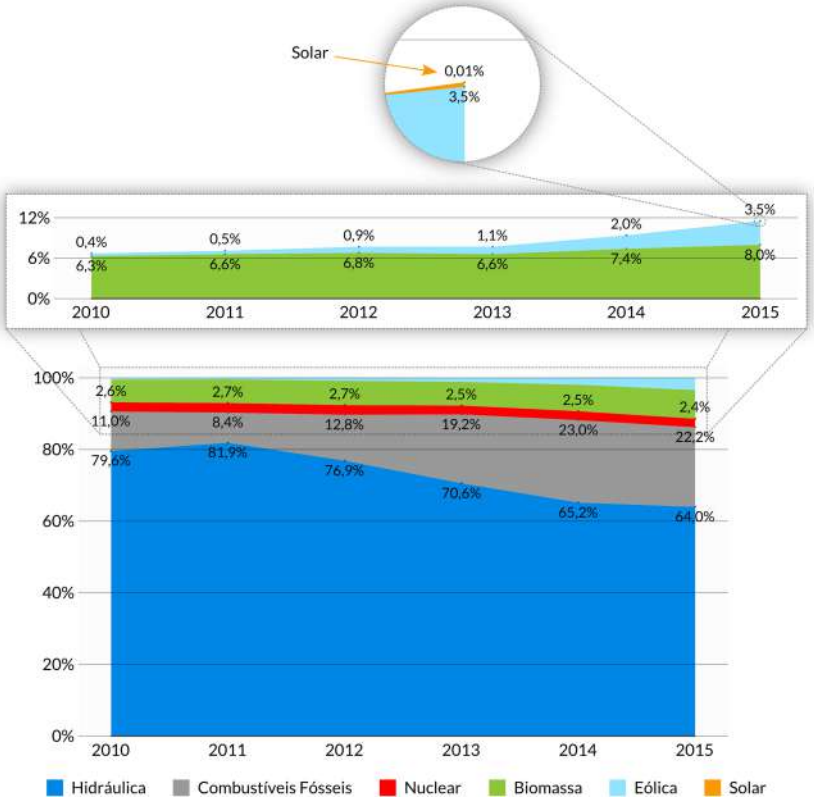


Figura 1. Percentual de participação na geração de energia elétrica no Brasil por tipo de fonte e detalhamento das renováveis não-hidro [4 - 9].

Diante deste contexto, torna-se necessário analisar a demanda de energia elétrica estimada no horizonte de longo prazo conforme mostrado na Figura 3, onde se evidencia a necessidade da ampliação de oferta de energia elétrica no país mediante outras fontes, em especial as renováveis não hídricas, como a solar.

A projeção indica que a demanda de energia elétrica deverá triplicar nos próximos 30 anos, tornando-se necessária a exploração de novas fontes de energia além das tradicionais. Fontes como biomassa (principalmente a de cana-de-açúcar) e a eólica já possuem participações importantes na matriz elétrica brasileira, com forte tendência de crescimento e com potencial bastante grande ainda a ser explorado.

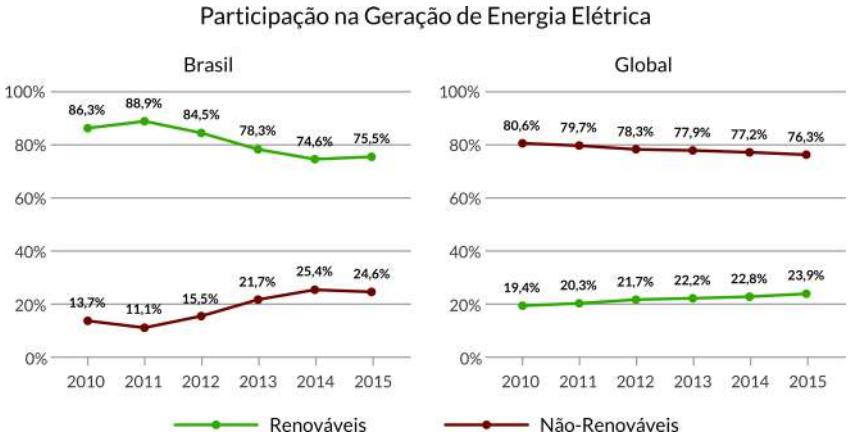


Figura 2. Percentual de participação na geração de energia elétrica das fontes renováveis e não renováveis no Brasil e Global [4 - 15].

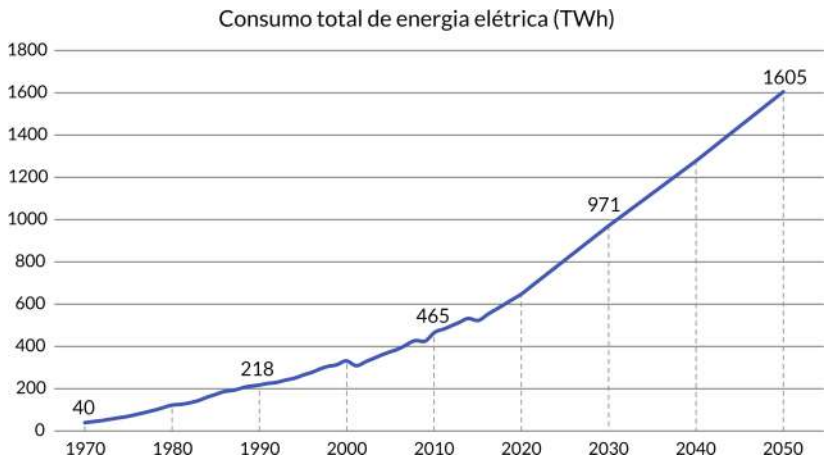


Figura 3. Série histórica e projeção da demanda de energia elétrica no Brasil no horizonte 2050 [16] [17].

Em relação à energia solar no Brasil, somente após a publicação da resolução normativa 482/2012 e dos leilões de energia elétrica promovidos pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) a partir de 2014 é que esta fonte passou a figurar na matriz elétrica nacional. Até então sua aplicação era encontrada basicamente em centros de pesquisa e em sistemas isolados, sem acesso à rede de distribuição.

A exploração das fontes energéticas, principalmente quanto à implantação de grandes usinas para geração de energia elétrica é complexa, muito em função dos impactos ambientais e sociais. A distância até os grandes centros consumidores também é um fator relevante uma vez que contribui para as perdas no Sistema Interligado Nacional - SIN, conforme apresentado na Figura 4.

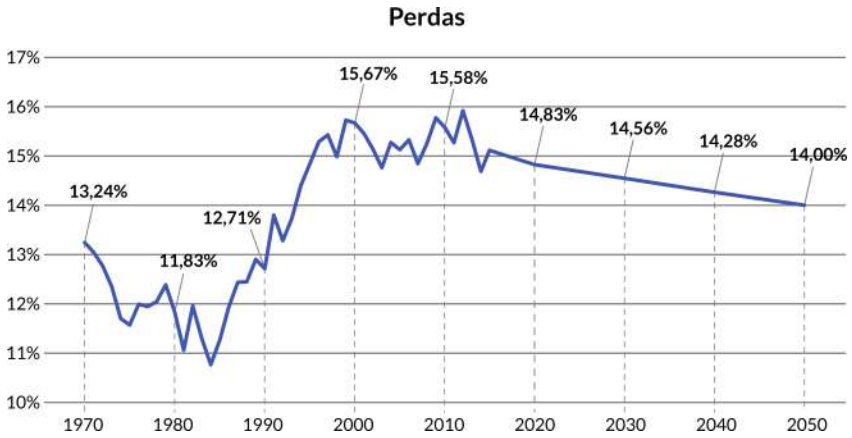


Figura 4. Série histórica das perdas no SIN e projeção no horizonte 2050 [16] [17].

As perdas previstas para 2050 são estimadas em 14% em relação ao total de energia elétrica gerada, o que representará cerca de 224,7 TWh, ou o equivalente à geração de 2,18 Itaipu's. A usina de Itaipu possui capacidade instalada de 14 GW e apresentou geração recorde de energia elétrica em 2016 de aproximadamente 103,1 TWh [18].

Este cenário tem favorecido a geração distribuída, com instalações ao longo dos alimentadores da rede elétrica, tanto em baixa como em média tensão, que contribuem para fornecer energia elétrica próxima ao ponto de consumo e, consequentemente, auxiliar na diminuição das perdas do sistema elétrico.

ENERGIA SOLAR E REGULAMENTAÇÃO

A energia solar é uma forma de energia limpa e silenciosa disponível em todo o planeta, sendo que o Brasil possui uma condição extremamente favorável, uma vez que apresenta valores de irradiação elevados em todo o seu território [19] [20].

Inesgotável na escala de tempo terrestre, o aproveitamento da energia solar é uma das mais importantes alternativas energéticas deste milênio, sendo o Sol responsável pela origem de, praticamente, todas as outras fontes de energia [21]. O Sol fornece energia na forma de radiação e, em função da sua distância até a Terra, apenas uma pequena parcela desta radiação solar atinge a superfície do planeta [22] [23]. A intensidade da radiação solar fora da atmosfera terrestre depende da distância entre o Sol e a Terra, que varia, aproximadamente, entre 147 e 152 milhões de quilômetros, com uma distância média de 150 milhões de quilômetros [24]. Como consequência, a irradiância (potência instantânea da radiação solar) oscila entre 1.325 W/m² e 1.412 W/m² [23], sendo o valor médio desta irradiância definido como Constante Solar. O valor mais aceito atualmente para a Constante Solar é de 1.366 W/m² [25] e representa a irradiância solar média anual medida num plano perpendicular à direção da propagação dos raios solares no topo da atmosfera terrestre [21].

Entretanto, este nível de irradiância não atinge a superfície da Terra, pois a atmosfera do planeta o reduz através da reflexão, absorção (pelo ozônio, vapor de água, oxigênio e dióxido de carbono) e dispersão (causada por moléculas de ar, partículas de poeira ou poluição em suspensão). Isto faz com que, ao meio-dia solar (momento em que o sol cruza o meridiano local), a irradiância incidente na superfície seja de aproximadamente 1.000 W/m² [21].

Pesquisas recentes mostram que a quantidade de energia solar incidente na superfície terrestre corresponde a aproximadamente 54% da irradiância no topo da atmosfera, sendo 7% dessa irradiância refletida pela superfície e 47% absorvida por ela. Os demais 46% são refletidos ou absorvidos pela própria atmosfera [21] [26]. Considerando que o raio médio da Terra é de 6.371 km e que a irradiância no topo da atmosfera é de 1.366 W/m² (Constante Solar), a potência total da radiação solar que chega no topo da atmosfera é de aproximadamente 174.000 TW (Tera Watts), o que equivale dizer que perto de 94.000 TW chegam à superfície do planeta. Para se ter uma idéia do que isso representa, a projeção de consumo energético global para 2040 é estimada em 238.000 TWh [27], sendo, portanto, necessárias menos de 3 horas para fornecer toda a energia consumida no planeta ao longo do ano, o que demonstra o excelente potencial da energia solar existente.

A radiação solar que entra na atmosfera da Terra é constituída por duas componentes: a radiação direta, que chega à superfície sem sofrer desvio em sua trajetória e que produz sombras nítidas, e a radiação difusa, que é proveniente de todas as direções devido ao espalhamento ocorrido na atmosfera para fora do feixe direto por moléculas, aerossóis e nuvens [21] [25]. Em dias totalmente nublados, 100% da radiação que chega à superfície é difusa. Em dias de céu

claro sem nuvens, a radiação difusa ainda é da ordem de 20%, sendo o restante radiação direta [21]. Entretanto, caso a superfície analisada esteja inclinada em relação à horizontal, haverá uma terceira componente refletida pelo ambiente de entorno (edificações, solo, vegetação, etc), onde o coeficiente de reflexão destas superfícies é denominado de Albedo. A representação básica das componentes da radiação solar é mostrada na Figura 5.

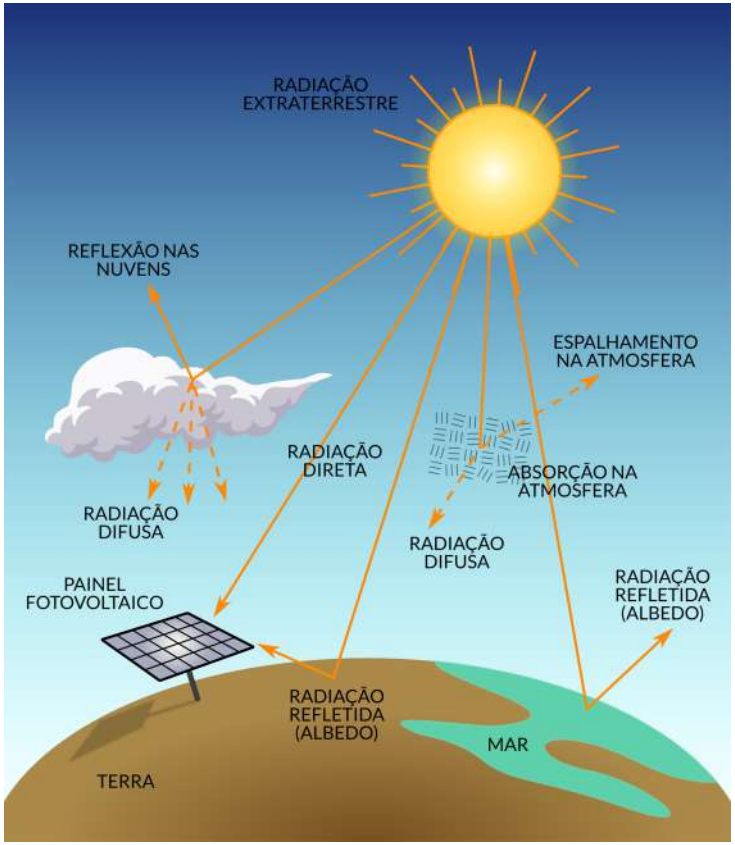


Figura 5. Representação das componentes da Radiação Solar.

Diversas são as aplicações da energia solar, desde processos térmicos para aquecimento de água em residências e indústrias, tecnologias para conversão da energia térmica em elétrica, até na geração de energia elétrica por meio de sistemas fotovoltaicos isolados (SFVI) ou conectados à rede elétrica (SFVCR).

A energia solar fotovoltaica é a energia gerada por meio da conversão direta da luz do sol em eletricidade, através do efeito fotovoltaico, onde a célula fotovoltaica, dispositivo construído com material semicondutor, é a unidade básica do processo, com sua aplicação extremamente difundida em todo o mundo principalmente através de SFVCR.

Os SFVCR são vistos como uma forma de geração distribuída (GD) ao longo dos alimentadores da rede elétrica de distribuição, em baixa ou média tensão, e contribuem para disponibilizar a energia próxima ao ponto de consumo [19]. Na Figura 6 é apresentada uma configuração básica de um SFVCR.

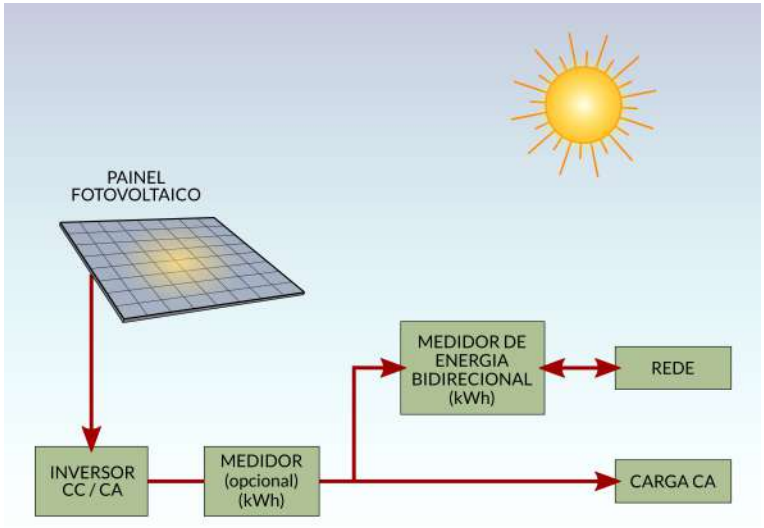


Figura 6. Configuração básica de um SFVCR tradicional.

Os SFVCR apresentam como principais características [19] [20]:

- Baixo impacto ambiental, pois na maior parte das vezes podem ser instalados na cobertura das edificações;
- São silenciosos e não emitem poluentes durante sua operação;
- Possuem baixo índice de manutenção;
- Podem ser instalados próximos ao ponto de consumo como forma de geração distribuída;
- Têm instalação rápida quando comparados a outras fontes renováveis;
- São modulares, ou seja, podem ser ampliados ou reduzidos conforme as necessidades do consumidor, ou ainda reinstalados em outro local;
- Não operam à noite;
- Podem ser instalados tanto pequenos sistemas, na forma de geração distribuída, como grandes plantas, através de usinas fotovoltaicas;
- Custos dos componentes, como inversores e módulos fotovoltaicos, cada vez menores, devido à escala de produção mundial e também à nacionalização dos mesmos.

A tecnologia fotovoltaica teve, inicialmente, maior aplicação em sistemas isolados, como por exemplo os empregados em satélites e em locais de difícil acesso ou sem conexão com a rede de distribuição urbana. Apenas com a evolução das tecnologias e dos processos produtivos e, consequentemente, com a queda de preço dos componentes no mercado internacional é que as aplicações em SFVCR se intensificaram.

A energia solar fotovoltaica tem tido uma taxa de crescimento bastante elevada de forma global. Entre 1996 e 1998, a capacidade instalada cresceu cerca de 100 MW ao ano e, em 1999, alcançou 1 GW. Em 2002, a capacidade instalada já havia dobrado e, em 2004, alcançou os 3,7 GW. Se até o ano 2000 praticamente toda capacidade instalada global era de sistemas fotovoltaicos isolados, em 2004 a capacidade instalada de SFVI e SFVCR se equivaliam, com valores próximos a 2 GW cada. A partir de 2005, a capacidade instalada de SFVCR cresceu exponencialmente, sendo que, em 2012, sua participação na capacidade instalada total global já era superior a 99% [17], sendo menos de 1% referente a sistemas isolados. Em 2016 a capacidade instalada total global foi de 303 GW [28] [29], um acréscimo de aproximadamente 75 GW e alta de 32,9% em relação a 2015.

Com relação aos países com maior capacidade instalada, até 2016, destacam-se a China (com 78,1 GW), seguida do Japão (42,8 GW), Alemanha (41,2 GW), Estados Unidos (40,3 GW), Itália (19,3 GW), Reino Unido (11,6 GW) e Índia (9 GW). Entre todos os países, a China é a que mais tem investido nesta tecnologia nos últimos anos (a exemplo do que fez a Alemanha em anos anteriores), acrescentando à sua capacidade instalada 71,25 GW em apenas 4 anos (34,5 GW em 2016; 15,2 GW em 2015; 10,6 GW em 2014; e 10,95 GW em 2013) [28] [29]. Com isso, em 2016, a participação da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica alcançou, em alguns países, valores representativos como é o caso de Honduras com 12,5% de participação, Grécia com 7,4%, Itália com 7,3%, Alemanha com 7,0% e Japão com aproximadamente 5%. Na América Latina, o destaque é o Chile, onde a energia fotovoltaica já corresponde a aproximadamente 3,5% da sua matriz elétrica. Estes valores representam, de forma inequívoca, a tendência mundial quanto a utilização da fonte solar fotovoltaica, em conjunto com outras fontes de energia, para atendimento da demanda crescente por energia elétrica [29].

A queda nos preços, aliada ao aumento da eficiência de conversão dos módulos fotovoltaicos, tem sido um vetor importante na aceleração do uso desta fonte de energia. As projeções indicam que a capacidade instalada total global de sistemas fotovoltaicos deverá crescer a uma velocidade ainda maior nas próximas décadas, com estimativa de 1.721 GW para 2030 e 4.674 GW para 2050, o que representará o equivalente à 6.000 TWh ou 15% de toda energia elétrica gerada no planeta em 2050 [30]. Isso mostra o alinhamento dos países quanto a um desenvolvimento mais sustentável, utilizando

fontes de energia limpas e renováveis como a solar fotovoltaica, o que contribui na redução das emissões dos gases de efeito estufa.

Quanto ao Brasil, a capacidade instalada até 2012 era incipiente e praticamente vinculada a Centros de Pesquisa e Universidades, com poucas iniciativas fora desse contexto. A partir de 2012, amparado na legislação que permite ao consumidor conectar-se à rede elétrica com seu gerador fotovoltaico e, mais recentemente, com os leilões de energia elétrica a partir de fonte solar, o país passou a figurar internacionalmente como um importante mercado na área de energia solar a ser explorado.

Até 2016, a capacidade instalada total acumulada de SFVCR no Brasil era de aproximadamente 81,7 MW (21 MW de geração centralizada e 60,7 MW de geração distribuída no sistema de compensação de energia) [9] [31], o que, no cenário internacional, ainda é pouco significativo. Entretanto, estão previstos grandes avanços na capacidade instalada em SFVCR, em função da disseminação da utilização desta fonte como geração distribuída e, principalmente, através dos leilões de energia de reserva, onde mais de 2 GW serão adicionados à matriz elétrica brasileira até 2018, o que começa a colocar o país em posição de destaque como mercado promissor de equipamentos e serviços vinculados a esta forma de geração de energia elétrica.

Segundo projeções da Empresa de Pesquisa Energética - EPE, em 2050, a capacidade instalada acumulada no Brasil em SFVCR, mediante micro e mini geração, deverá estar entre 78 GW e 118 GW, o que representará algo entre 5,7% e 8,7% da demanda total de energia elétrica prevista para o período [17].

GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NO ESTADO DO PARANÁ

Pesquisas recentes mostram o excelente potencial existente no Estado do Paraná, com média de radiação solar superior à maioria dos países europeus, onde está concentrada a maior parte da capacidade instalada mundial [32] [20].

O primeiro Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica (SFVCR) instalado no estado foi implantado no Escritório Verde da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Curitiba, ainda antes da publicação da resolução 482/2012 da ANEEL, apresentado na Figura 7. Este sistema possui 2,1 kW de potência instalada, com módulos de silício policristalino, e encontra-se em operação, de forma ininterrupta, desde dezembro de 2011.

Figura 7. SFVCR instalado no Escritório Verde da UTFPR - Campus Curitiba*.

*O Escritório Verde da UTFPR é um modelo de edificação sustentável de 150m² de área construída e que adotou diversas estratégias de sustentabilidade em parceria com mais de sessenta empresas. Além de utilizar iluminação natural e lâmpadas LED, o projeto também optou pela geração fotovoltaica como linha mestra para prover energia à edificação por meio de um SFVCR, o qual gera anualmente energia elétrica superior a necessária para atender as cargas existentes, tornando a mesma uma edificação de energia zero (*ZEB – Zero Energy Building*).

Em 2012 foi instalado na Empresa ELCO Engenharia um SFVCR de 8,64 kW de potência instalada, com módulos de silício monocristalino, sendo considerado o primeiro implantado após a publicação da resolução 482/2012 da ANEEL e homologado pela concessionária de energia COPEL, apresentado na Figura 8.

Figura 8. SFVCR instalado na empresa Elco Engenharia.

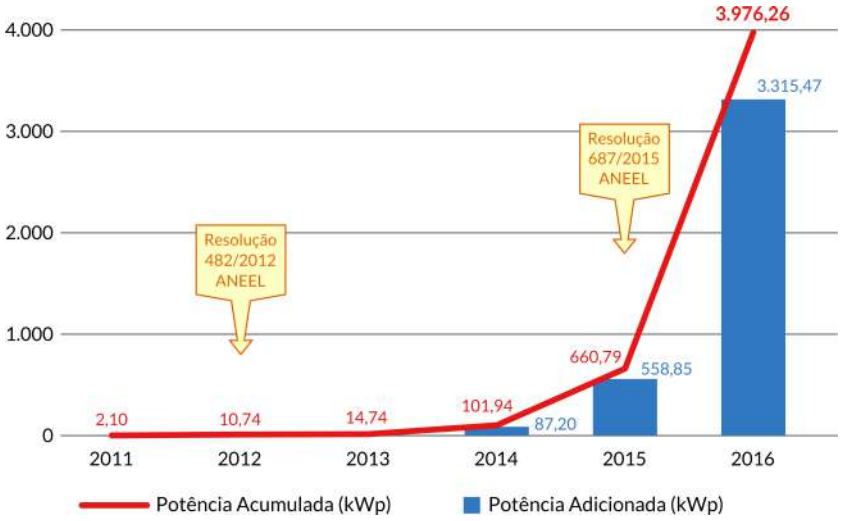


Figura 9. Evolução da Capacidade Instalada em SFVCR no Estado do Paraná [31]*.

* Levantamentos próprios da UTFPR nos anos 2011 e 2012.

Nos anos seguintes, agora sob o amparo da legislação, outros Sistemas Fotovoltaicos passaram a contribuir na forma de Geração Distribuída (GD) com o Sistema Elétrico no Paraná, chegando, ao fim de 2016, a uma potência instalada de aproximadamente 4 MW [31], conforme é mostrado na Figura 9.

As projeções, a exemplo do que deverá acontecer no Brasil até 2050, são bastante otimistas quanto à utilização desta tecnologia no estado, quer seja na forma de geração distribuída, através de micro e mini geração, como também na implantação de geração centralizada.

REGULAMENTAÇÃO PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA (GD) NO BRASIL

O Sistema de Compensação de Energia Elétrica, instituído pela Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012 (REN 482/2012) pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), permite que o consumidor instale geradores que utilizam fontes renováveis de energia (Sistemas Fotovoltaicos, Geradores Eólicos, Micro Geradores Hidráulicos, Biomassa) em sua unidade consumidora e troque energia com a distribuidora local com o objetivo de reduzir o valor da sua fatura de energia elétrica.

No Sistema de Compensação, quando a quantidade de energia gerada for superior à energia consumida em determinado mês, o consumidor ficará com créditos que poderão ser utilizados para diminuir o valor da fatura dos meses subsequentes. Estes mesmos créditos poderão ser, também, utilizados para abater o consumo em unidades consumidoras do mesmo titular situadas em outro local, desde que estes pertençam à mesma área de atendimento da distribuidora. Esse tipo de utilização dos créditos é chamado de "autoconsumo remoto".

De acordo com a ANEEL, as adesões ao modelo de geração distribuída têm crescido expressivamente desde as primeiras instalações, sendo que até 2016 haviam aproximadamente 6.000 unidades consumidoras com SFVCR no Brasil [31].

Visando aperfeiçoar as regras relativas ao Sistema de Compensação, a ANEEL, baseada em contribuições recebidas em audiências públicas para este fim, atualizou a REN 482/2012 gerando a REN 517/2012 e, em 2015, houve nova atualização com o lançamento da REN 687/2015, que entrou em vigor em 01 de março de 2016. Entre as principais atualizações estão:

a) **Faixas de Microgeração e Minigeração Distribuída:**

- *Microgeração distribuída:* central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW (antes era até 100 kW);
- *Minigeração distribuída:* central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW para a fonte solar (antes era entre 100 kW e 1 MW).

b) **Tempo para a compensação dos créditos:**

- O prazo de validade dos créditos a serem compensados passou de 36 para 60 meses.

c) **Múltiplos Consumidores:**

- *Empreendimento com múltiplas unidades consumidoras:* caracterizado pela utilização da energia elétrica de forma independente, no qual cada fração com uso individualizado constitua uma unidade consumidora e as instalações para atendimento das áreas de uso comum constituam uma unidade consumidora distinta, de responsabilidade do condomínio, da administração ou do proprietário do empreendimento, com microgeração ou minigeração distribuída, desde que as unidades consumidoras estejam localizadas em uma mesma propriedade ou em propriedades contíguas;
- *Geração compartilhada:* caracterizada pela reunião de consumidores dentro da mesma área de concessão ou permissão, por meio de consórcio ou cooperativa, composta por pessoa física ou jurídica que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada.

Com relação aos procedimentos necessários para conectar a micro ou minigeração distribuída à rede da distribuidora, a ANEEL estabeleceu novas regras para simplificar o processo, com o prazo dado às concessionárias para implantar o acesso sendo reduzido de 82 para 34 dias e, a partir de 2017, as concessionárias deverão, ainda, disponibilizar o serviço de solicitação do acesso via Internet.

TRIBUTAÇÃO SOBRE A ENERGIA ELÉTRICA COMPENSADA

O governo federal publicou, em 07 de outubro de 2015, a desoneração do PIS e do COFINS que incidem sobre a geração distribuída de energia solar. Essa desoneração é mais um incentivo ao setor e melhora ainda mais a viabilidade para instalação de Sistemas de Geração de Energia Solar Fotovoltaica [33].

Em relação ao ICMS, imposto com maior alíquota na tarifa de energia elétrica, ficou a cargo dos estados, mediante adesão ao convênio ICMS 16 (publicado em 22 de abril de 2015), isentarem ou não a sua cobrança sobre a energia elétrica compensada [34].

ESTADO DO PARANÁ

O Estado do Paraná situa-se ao sul do Brasil, com área de 199.880 km² distribuída em 399 municípios e com população de, aproximadamente, 10,44 milhões de habitantes. Em relação ao consumo de energia elétrica, este apresentou, no ano de 2015, um consumo em torno de 28,9 TWh [35]. Na Figura 10 são mostradas as mesorregiões do estado e, de forma geral, a distribuição e o número estimado de habitantes dos 399 municípios, evidenciando as maiores concentrações e, consequentemente, onde estão localizados os maiores centros de consumo de energia.

Os municípios foram numerados por ordem alfabética, com exceção da capital do Paraná que, por sua relevância, recebeu o número 1. A lista completa dos municípios que compõe o estado encontra-se no ANEXO A.

O clima do Paraná apresenta contrastes nos regimes de precipitação e temperatura sendo a maior parte deles resultado do relevo e da localização geográfica do estado. Caracterizado como transição entre os climas quentes das baixas latitudes e o clima temperado (subtropical) das latitudes médias, seu regime de precipitação possui uma importante contribuição dos sistemas frontais

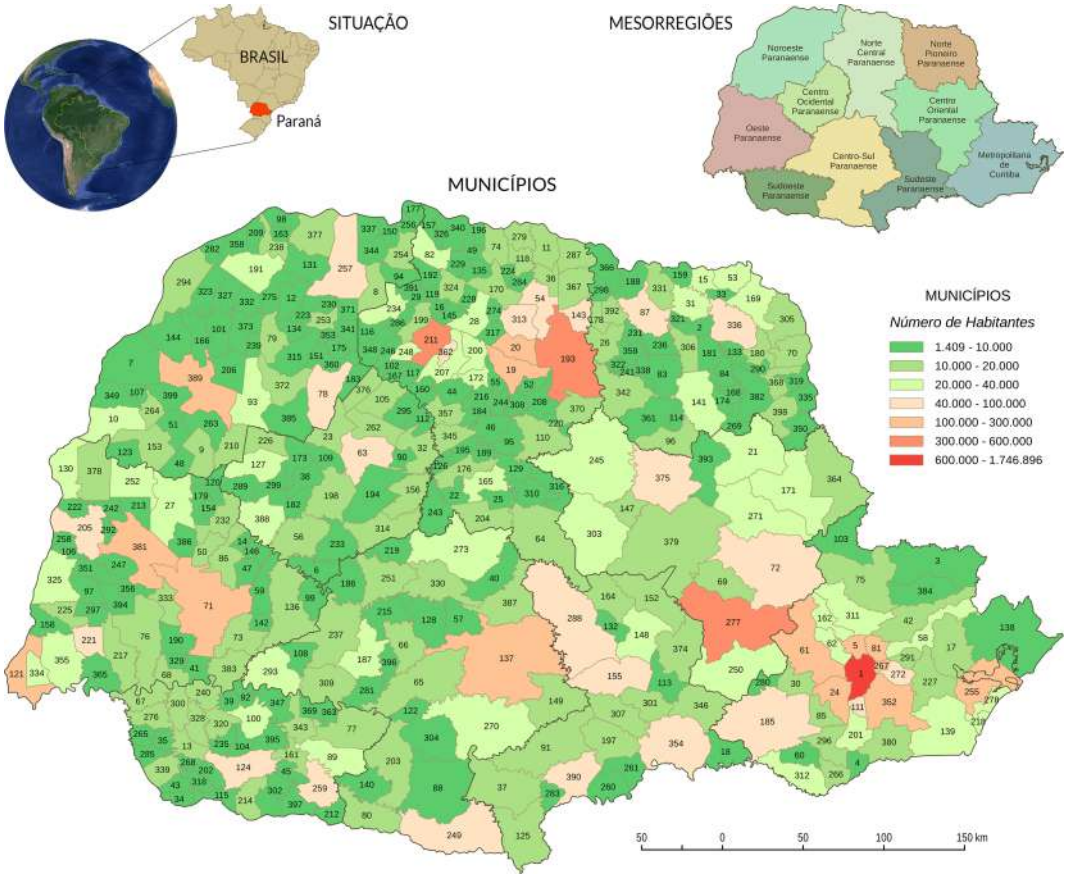


Figura 10. Mapa do Estado do Paraná com os municípios e suas respectivas mesorregiões [36][37][38].

e de fenômenos como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Também influenciam nos totais pluviométricos, os Vórtices Ciclônicos de médios e de altos níveis, efeitos de convecção local e de circulação marítima, além dos Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM's). A transição deste regime é identificada de forma bastante clara, com a estação chuvosa iniciando-se na primavera e terminando no início do outono. Os efeitos topográficos também são facilmente notados, estando as maiores precipitações da região associadas à ascensão sobre barreira topográfica. Esta precipitação é praticamente homogênea, mas com um gradiente no sentido Norte para Sul do estado.

A localização geográfica também garante uma das maiores amplitudes do ciclo anual de temperatura no Brasil, com maior contraste entre o inverno e o verão. Além disso, o planalto meridional e as serras produzem diferenças relevantes na distribuição das temperaturas, fazendo com que o Paraná esteja incluído na única região do Brasil com precipitação em forma de neve [39].

O ciclo anual de temperatura possui maiores amplitudes na porção sul do estado, de acordo com as Normais Climatológicas do INMET [41]. Também é possível perceber um gradiente decrescente das temperaturas no sentido Noroeste para Sudeste, associado ao aumento das altitudes. Verifica-se um gradiente crescente na precipitação, das regiões Norte, Noroeste e Nordeste para a região Sudoeste. O mapa de relevo do Paraná é mostrado na Figura 11.

O clima no Estado do Paraná, nas regiões Central, Norte, Oeste e Nordeste é do tipo Subtropical, com temperatura média, no mês mais frio, próxima a 14°C e temperatura média, no mês mais quente, acima de 24°C. O verão é bem definido e quente, com tendência a concentração das chuvas nos meses de verão. O clima nas regiões com maiores altitudes (Sul e Sudeste do estado) é temperado, com temperaturas médias, no mês mais frio, em torno de 10°C e temperatura média, no mês mais quente, próxima aos 22°C [41] [42].

Dentro do território do Estado do Paraná há 16 bacias hidrográficas: Bacia Litorânea, Bacia do Ribeira, Bacia do Cinzas, Bacia do Iguaçu, Bacias do Paraná 1, 2 e 3, Bacia do Tibagi, Bacia do Ivaí, Bacia do Piquiri, Bacia do Pirapó, Bacia do Itararé, Bacias do Paranapanema 1, 2, 3 e 4 [43]. Dentre os rios mais extensos há o Rio Paranapanema, que faz limite com o Estado de São Paulo, e o Rio Iguaçu, que faz, em parte, limite com o Estado de Santa Catarina e a República da Argentina. O Rio Paraná faz os limites ocidentais ou a Oeste do estado, que o separam do Estado do Mato Grosso do Sul e da República do Paraguai [44].

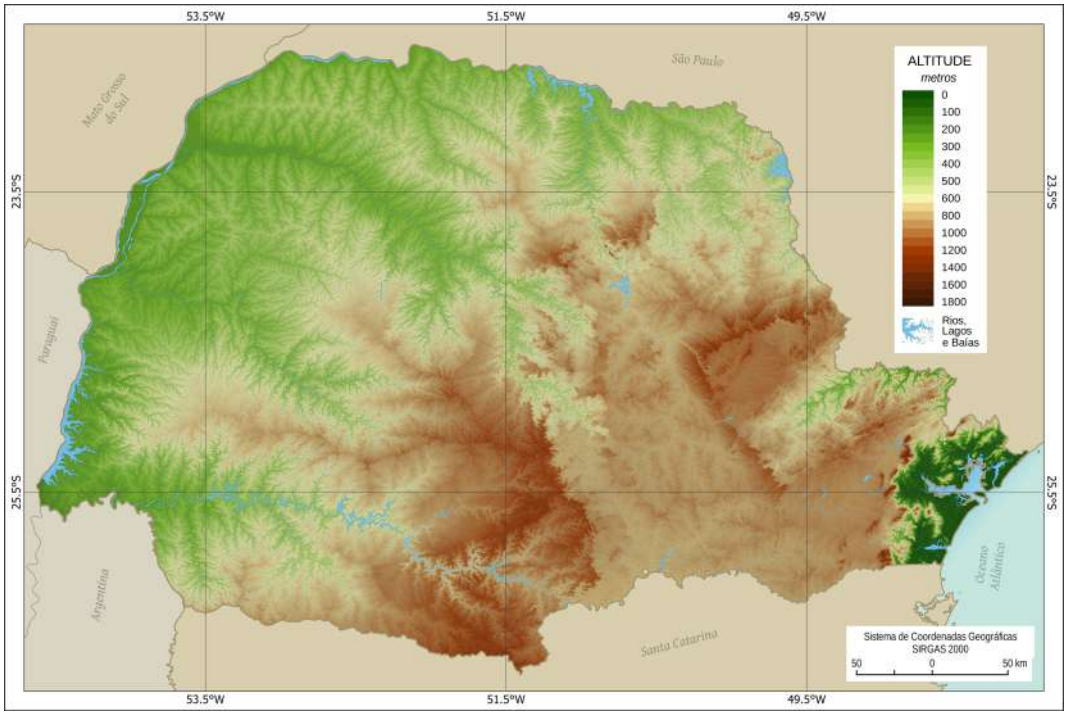


Figura 11. Mapa de Relevo do Estado do Paraná [36] [40].

Devido ao Estado do Paraná apresentar recursos hídricos abundantes, oriundos das diversas bacias hidrográficas, importantes usinas hidroelétricas foram construídas. O Estado do Paraná tem se destacado como o maior gerador de eletricidade do país entre as unidades federativas, o que representou, em 2015, um total gerado de 99.410 GWh. Este valor equivale a, aproximadamente, 17,1% de toda a energia elétrica produzida no país. A maior parte desta geração é realizada pelas hidroelétricas, que corresponderam em 2015 a um total próximo a 94,4% do total gerado no estado, o que mostra a vocação do Paraná na geração de energia elétrica [45].

Esta representatividade faz com que o Paraná seja um elo importante do sistema elétrico Sul com o resto do país, porque boa parte de toda a energia elétrica gerada abastece, principalmente, estados das regiões Sudeste e Centro-Oeste. Na Figura 12 é mostrado o Sistema Elétrico no Estado do Paraná.

Entretanto, a exploração da fonte hidráulica no Paraná tem encontrado barreiras (a exemplo do Brasil), em virtude do potencial já explorado e, mais recentemente, devido às discussões sobre os impactos ambientais e sociais gerados, o que torna sua expansão na matriz elétrica cada vez menor.

Importante destacar as demandas futuras de energia elétrica. Entre 2004 e 2014, a demanda por energia elétrica no Paraná foi, em média, o equivalente a 5% da nacional [47]. Seguindo a mesma tendência de crescimento da demanda no Brasil, o Paraná deverá consumir aproximadamente 80 TWh em 2050.

Diante disto, o levantamento do potencial de energia solar e fotovoltaico no Estado do Paraná é de fundamental importância, de forma a auxiliar governo, consumidores e investidores quanto à utilização desta fonte renovável de energia, complementando a atual matriz elétrica e, consequentemente, norteando o planejamento energético do estado.

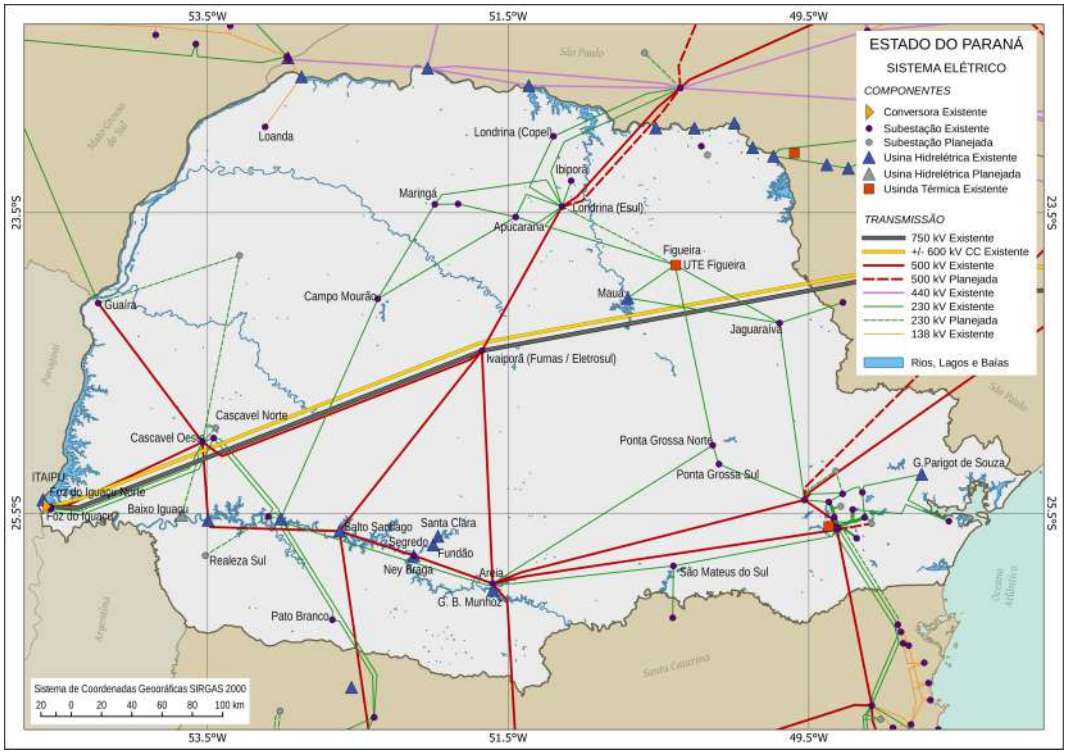


Figura 12. Sistema Elétrico do Estado do Paraná [36] [46].

METODOLOGIA

Neste capítulo é realizada uma descrição do modelo de Transferência Radiativa BRASIL-SR, utilizado para as estimativas do fluxo de radiação para o Estado do Paraná, além da metodologia e da base de dados utilizada para a sua validação. São mostrados os resultados obtidos pela comparação entre estimativas e medidas em superfície da irradiação solar, bem como a descrição dos diagramas e discussões sobre os erros médios.

DESCRIÇÃO DO MODELO PARA ESTIMAR A IRRADIAÇÃO SOLAR

O modelo BRASIL-SR é um modelo físico para obtenção de estimativas da irradiação solar incidente na superfície, que combina a utilização da aproximação de "dois-fluxos". Adotado para solucionar, de forma rápida, a equação de transferência radiativa, este método se baseia na decomposição do campo de radiação em dois fluxos de radiação perpendiculares à superfície – um fluxo no sentido do topo da atmosfera e outro incidente na superfície – e, assim, chegar à solução da equação de transferência radiativa com o auxílio de parâmetros determinados de forma estatística a partir de imagens de satélite.

Inicialmente desenvolvido na Alemanha [48], foi adaptado para as condições climáticas brasileiras por meio de convênio estabelecido entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O modelo segue em constante aprimoramento pelo Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia do Centro de Ciência do Sistema Terrestre (LABREN/CCST/INPE) e teve diversas melhorias implementadas em suas parametrizações, como a metodologia para identificação de cobertura de nuvens, perfis atmosféricos, conteúdo de água precipitável [49], aerossóis atmosféricos [50], dentre outras.

A cobertura de nuvens é considerada o principal fator de modulação da transmitância atmosférica [49] e as demais propriedades óticas da atmosfera são parametrizadas a partir de variáveis meteorológicas, em seus valores médios mensais, como temperatura do ar e umidade relativa. A visibilidade atmosférica e o albedo de superfície também são dados de entrada, além dos dados de relevo da região de interesse.

Os dados de temperatura do ar e de umidade relativa média mensal foram gerados a partir dos valores médios diários observados em estações meteorológicas distribuídas pelo território brasileiro e operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Já a cobertura de nuvens (C_{eff}) é determinada a partir de análises estatísticas de imagens de satélite e permitem ao modelo inferir a transmitância em função não só da presença da nebulosidade, mas também pela variação espacial da sua profundidade ótica [49] [50].

Como a nebulosidade é considerada o principal fator de transmitância atmosférica, o modelo assume que o fluxo de radiação solar no topo da atmosfera está, linearmente, distribuído entre as duas condições extremas – céu claro e céu completamente encoberto por nuvens. É assumida, também, a existência de uma relação linear entre a irradiância global na superfície e o fluxo de radiação refletido no topo da atmosfera, conforme Equação 1:

$$F_{\downarrow} = \left\{\left(1 - C_{eff}\right) \cdot T_{clear} + C_{eff} \cdot T_{cloud}\right\} \cdot F_0 \qquad (1)$$

onde: $F_{\downarrow}$ é o fluxo de radiação solar global incidente na superfície, F_o é a radiação incidente no topo da atmosfera, T_{clear} e T_{cloud} são as transmitâncias atmosféricas em condições de céu claro e completamente nublado, respectivamente. Desta forma, a determinação da radiação solar incidente na superfície pode ser estimada a partir destas duas componentes independentes. Os processos radiativos simulados no modelo são: nuvens, espalhamento Rayleigh devido aos gases atmosféricos, absorção por gases atmosféricos (O_3, CO_2 e vapor d'água) e espalhamento Mie devido aos aerossóis.

Para o cálculo de T_{cloud}, o modelo BRASIL-SR assume que: a microfísica de nuvens é definida pela distribuição de tamanhos de gotículas do tipo de nuvem; as nuvens atenuam totalmente a radiação direta proveniente do Sol em condições de céu encoberto; e as nuvens são, vertical e horizontalmente, homogêneas. A espessura ótica das nuvens em cada uma das camadas atmosféricas em que estão presentes é determinada assumindo que o conteúdo total de água presente na nuvem está isotropicamente distribuído. A determinação da transmitância atmosférica em qualquer condição de nebulosidade é incluída no modelo através do coeficiente de cobertura efetiva de nuvens C_{eff} mostrado na Equação 1.

A parcela da radiação difusa é estimada considerando o efeito das múltiplas reflexões entre as diversas camadas atmosféricas e que o albedo de superfície é idêntico para a radiação difusa e radiação direta. A transmitância atmosférica da componente direta da radiação solar é nula para a condição de céu completamente encoberto. Para as demais condições de nebulosidade, o valor da transmitância da componente direta é determinado utilizando a metodologia descrita em Sthulmann [48], em que o valor de C_{eff} é utilizado para estimar a atenuação do feixe de radiação incidente na direção do Sol.

Na Figura 13 é apresentado o fluxograma descritivo dos principais procedimentos do modelo BRASIL-SR para parametrização dos processos radiativos na atmosfera.

Os valores de irradiação diária foram estimados pelo modelo BRASIL-SR com base em 134.966 imagens do satélite GOES (*Geostationary Operacional Environmental Satellite*) da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) [51] e nas demais informações necessárias já descritas, compreendendo o período entre 1999 e 2015. A partir desses dados foram calculadas as médias mensal, sazonal e anual para o Estado do Paraná.

BASE DE DADOS PARA VALIDAÇÃO DAS ESTIMATIVAS

Estimativas do recurso de energia solar obtidas com o uso de modelos numéricos estão sujeitas a incertezas relacionadas aos métodos matemáticos de simulação dos processos físicos, qualquer que seja a região de interesse. O procedimento de avaliação das incertezas presentes nas estimativas é essencial para possibilitar o uso correto da base de dados para a radiação solar incidente na superfície. Esse procedimento é conhecido como etapa de validação da metodologia. Normalmente realizada por meio da comparação das estimativas do modelo com as medições das estações de coleta de dados em superfície, devem atender um conjunto de critérios definido nas especificações ISO 9060 [52].

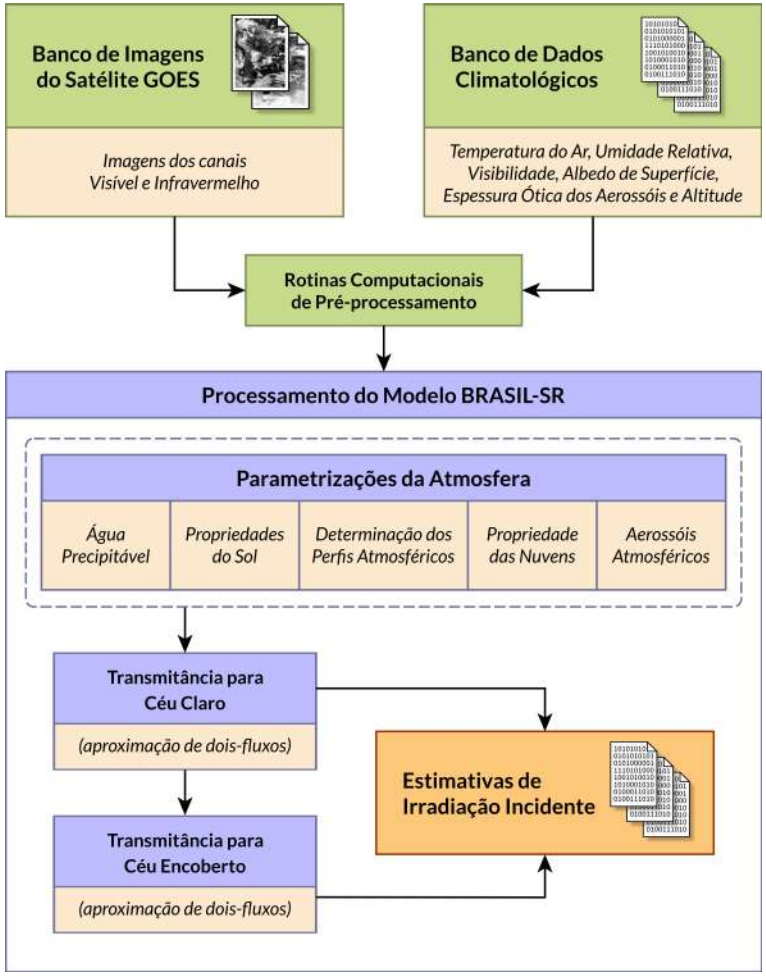


Figura 13. Fluxograma simplificado de execução do modelo BRASIL-SR.

Para a validação dos resultados apresentados neste estudo, foram utilizados dados diários de irradiação solar global e direta normal, espacialmente distribuídos no Estado do Paraná e regiões vizinhas. Trata-se de 24 estações meteorológicas automáticas de superfície operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e 3 estações de superfície operadas pelo Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA). A localização destas estações pode ser verificada na Figura 14.

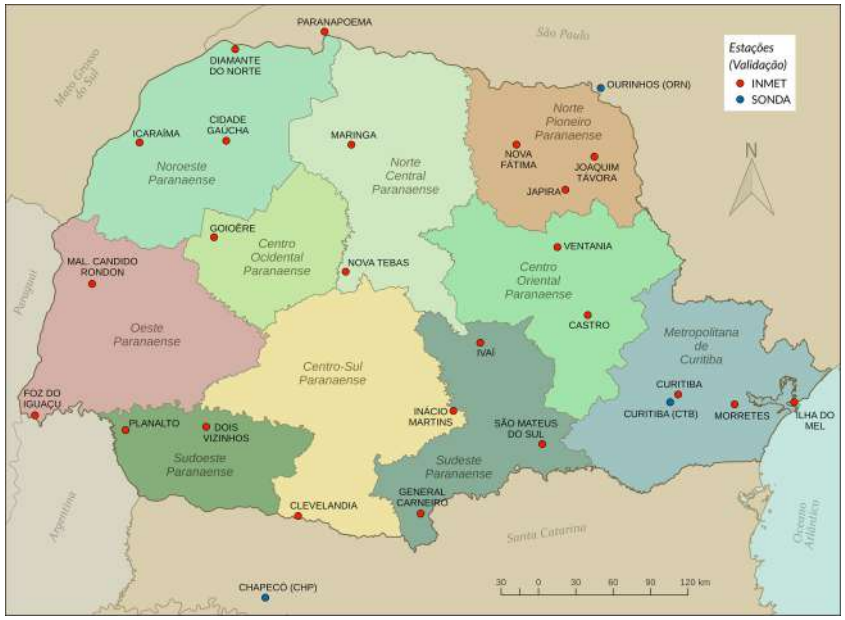


Figura 14. Localização das Estações da Rede SONDA (Azul) e do INMET (Vermelho) [36] [37].

As estações meteorológicas automáticas do INMET operam com a transmissão dos seus dados via satélite ou telefonia e estão distribuídas por todo o território nacional. Uma estação meteorológica ou ambiental automática é composta de uma unidade de memória central (*datalogger*) ligada a vários sensores dos parâmetros meteorológicos (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, direção e velocidade do vento, entre outras). Para fins de radiometria, as estações do INMET possuem menor acurácia uma vez que utilizam piranômetros de segunda classe adequados a estudos

meteorológicos. No entanto, ainda apresentam dados bastante confiáveis dentro de uma faixa de erro e de precisão aceitáveis para uso no processo de validação.

A rede SONDA é uma iniciativa coordenada pelo INPE/CCST/LABREN desde 2004 para coleta, qualificação e disponibilização de dados ambientais com foco no desenvolvimento e na expansão de fontes renováveis de energia, em especial as fontes solar e eólica. Contando com a colaboração de diversos Institutos de Pesquisa e Universidades Brasileiras, a rede SONDA opera 17 estações de medição, dentre próprias e parceiras. Nesta validação, as três estações utilizadas foram: Curitiba, Ourinhos e Chapecó. As duas últimas, apesar de não estarem localizadas dentro dos limites do Estado do Paraná, foram consideradas neste processo pela proximidade geográfica e por fornecerem dados de irradiação direta normal. Em função da própria motivação da rede, os sensores (piranômetros, pirgeômetros, etc.) são de padrão secundário, de alta qualidade, garantindo um menor erro associado às medidas.

A base de dados observados utilizada no procedimento de validação compreende o período de 2005 a 2015, totalizando 27 estações de superfície com qualidade adequada para participar na validação das estimativas fornecidas pelo modelo BRASIL-SR.

Para que os dados pudessem ser utilizados no processo de validação, foi aplicado um processo de qualificação com critérios de qualidade baseados naqueles estabelecidos pela *World Meteorological Organization* (WMO) para a *Baseline Surface Radiation Network* (BSRN) [53]. Rotinas computacionais foram desenvolvidas com o intuito de identificar possíveis inconsistências nos valores medidos. Foram realizadas, também, intercomparações de observações com sensores distintos e a comparação com modelos numéricos de céu claro (*clearsky*) a fim de eliminar, tanto quanto possível, os registros suspeitos.

Os dados medidos permitiram o pós-processamento das estimativas de irradiação solar do modelo. Os padrões de Erro Médio (*Viés*) a cada mês foram modelados estatisticamente a partir de técnicas de regressão espacial local, gerando ajustes nos mapas finais de irradiação. Estes ajustes foram calibrados de maneira criteriosa, utilizando como métrica amostras independentes contendo os dados de melhor qualidade oriundos da rede SONDA. Esta etapa permitiu uma importante redução nas incertezas do modelo, dando maior confiabilidade aos mapas climatológicos disponibilizados neste Atlas.

PROCESSO DE VALIDAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DO MODELO

O processo de validação da irradiação global no Estado do Paraná foi realizado por mesorregiões. As estações de Ourinhos e de Chapecó foram incluídas nas mesorregiões Norte Pioneiro e Sudoeste, respectivamente. Para a validação da irradiação solar direta normal foram utilizadas apenas as estações operadas pela rede SONDA.

Diversas são as formas de comparação de resultados de modelos numéricos com dados observados. Neste trabalho empregou-se as métricas estatísticas descritas por Weber [54]. Esta validação utiliza quatro índices estatísticos: o Erro Médio (*Viés*), o Erro Médio relativo (*rViés*), a Raiz do Erro Quadrático Médio relativo (*rRMSE*) e o Coeficiente de Correlação (*r*).

O *Viés* indica a tendência do modelo BRASIL-SR em superestimar (valores positivos) ou subestimar (valores negativos) o comportamento de uma determinada variável, conforme descrito na Equação 2:

$$Viés = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\phi_i - \phi_0) \qquad (2)$$

O *Viés* relativo indica o erro médio do modelo em porcentagem sobre o valor da média, dada pela Equação 3:

$$rViés = \left| 100 \cdot \frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\phi_i - \phi_0)}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\phi_0)} \right| \quad (3)$$

onde: ϕ_o é o valor observado da variável no i-ésimo instante do tempo e ϕ_i é o valor da mesma variável produzida pelo modelo correspondente ao mesmo instante de tempo do observado e N é o número de amostras de tempo da série.

O $rRMSE$ dá uma noção do espalhamento entre os dados medidos em superfície e os estimados pelo modelo e, quanto menores forem os valores, melhor será o desempenho. O cálculo do $rRMSE$ é dado pela Equação 4:

$$rRMSE = 100 \cdot \frac{\left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\phi_i - \phi_0)^2\right]^{1/2}}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\phi_0)} \quad (4)$$

Segundo Heinemann [55], o desempenho de um modelo de estimativa de irradiação pode ser considerado excelente se $rRMSE < 10\%$; bom se $10\% \leq rRMSE \leq 20\%$; aceitável se $20\% \leq rRMSE \leq 30\%$; e pobre se $rRMSE \geq 30\%$.

O coeficiente de correlação de Pearson é uma medida adimensional de associação linear entre as estimativas e os dados medidos, variando de -1 a 1. A estimativa ideal é aquela que atinge o valor mais próximo de 1. Uma interpretação mais detalhada do coeficiente de correlação estatística r pode ser vista em Devore [56], conforme Equação 5.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N}(\phi_i - \overline{\phi_i})(\phi_0 - \overline{\phi_0})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(\phi_i - \overline{\phi_i})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{N}(\phi_0 - \overline{\phi_0})^2}} \quad (5)$$

onde: ϕ_i, ϕ_0, $\overline{\phi_i}$, e $\overline{\phi_0}$ são os dados estimados, dados observados e suas respectivas médias.

VALIDAÇÃO DA IRRADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL

Nas figuras de dispersão são apresentados diagramas para as mesorregiões do Paraná em que as estimativas (ordenadas) são comparadas às observações (abscissas) de irradiação. Em todos os diagramas de dispersão apresentados neste capítulo, as linhas azuis são diagonais que passam pela origem dos gráficos e possuem coeficiente angular unitário, representando os casos em que as estimativas seriam perfeitas, assumindo o mesmo valor das observações. Nos gráficos de histograma são mostradas as frequências dos desvios do modelo para cada mesorregião do Paraná, exceto para a radiação direta normal onde é mostrado apenas um gráfico para todo o estado. A linha contínua azul representa a probabilidade cumulativa para os desvios observados.

Nas figuras 15a e 15b são apresentados os diagramas dos índices estatísticos para todas as mesorregiões. Observa-se que em todas as figuras o modelo apresenta um excelente

desempenho, com baixo *Viés*, sendo capaz de estimar a irradiação solar global horizontal com erros tipicamente inferiores a 3,7% na mesorregião Sudeste e 0,1% na mesorregião Norte Pioneiro, em referência à irradiação média anual. Em relação à média mensal do total diário de irradiação no local, os erros são tipicamente inferiores a 9,5%.

Verifica-se uma ligeira subestimativa da irradiação nas mesorregiões Norte Central, Norte Pioneiro, Sudoeste, Oeste, Centro Ocidental, Noroeste, Centro-Sul e Metropolitana de Curitiba com valores variando entre -70 Wh/m².dia e -3 Wh/m².dia, enquanto as regiões do Sudeste e Centro Oriental apresentaram uma ligeira superestimativa de 150 Wh/m².dia e 32 Wh/m².dia respectivamente. De maneira geral os valores de *Viés* estão contidos dentro de uma faixa estreita de -70 Wh/m².dia a 150 Wh/m².dia, sendo esta a incerteza a ser considerada quando utilizadas as médias anuais de irradiação solar disponibilizadas por este Atlas.

Em uma análise complementar, ao considerar-se o desempenho do modelo em uma escala diária, nota-se que este apresenta coeficientes de correlação elevados, sempre superiores a 0,95. O *rRMSE* apresenta valores inferiores a 15% em todas as mesorregiões, o que confirma o bom desempenho global do modelo. Os melhores valores foram encontrados nas Mesorregiões Noroeste (9,5%) e Norte Pioneiro (9,6%), com desempenho excelente. As demais regiões apresentaram estimativas consideradas boas em termos de desempenho, sendo maiores os erros das regiões Metropolitana de Curitiba (13,0%) e Sudeste (12,9%), indicando um bom potencial para estimativas diárias de irradiação global.

Nas figuras 16a e 16b são apresentados os histogramas de frequência e as curvas da probabilidade cumulativa (linha contínua em azul) obtidos dos desvios entre os dados medidos em superfície e estimados pelo modelo. Os histogramas mostram que ocorreu uma maior dispersão e deslocamento do centro do histograma para as Mesorregiões Sudeste, Sudoeste, Norte Central e Centro Ocidental, enquanto as demais mesorregiões apresentaram um histograma mais centrado em zero com uma distribuição mais próxima de uma distribuição normal. Esses resultados mostram que o modelo apresenta desempenho satisfatório para o Estado do Paraná, sendo capaz de estimar a irradiação solar global horizontal com grande acurácia.

VALIDAÇÃO DA IRRADIAÇÃO DIRETA NORMAL

A validação das estimativas de irradiação direta normal foi realizada apenas com dados de superfície coletados nas estações da rede SONDA localizadas em Curitiba-PR, Ourinhos-SP e Chapecó-SC, sendo as únicas que dispunham desta componente da radiação.

Na Figura 17 são apresentados, em conjunto, a dispersão entre valores observados e estimados e o histograma dos desvios das três estações de medição. O *Viés* observado tende a subestimar os dados medidos em 8,9%, o que corresponde a 463 Wh/m².dia na média anual, mostrando o bom desempenho do modelo nas estimativas ao longo do ano. De maneira geral, o desvio médio apresentado (*Viés*) para a componente direta normal é da mesma ordem de grandeza dos desvios apresentados por outros modelos utilizados pela comunidade científica [32].

Observa-se um alto valor de correlação de 0,92 e um valor de *rRMSE* de 22,2% indicando, também, um bom potencial para estimativas diárias de irradiação direta normal. É importante salientar que a representatividade do erro de irradiação direta normal é mais restrita em relação à irradiação global, uma vez que dados medidos de irradiação direta normal são mais escassos no território paranaense.

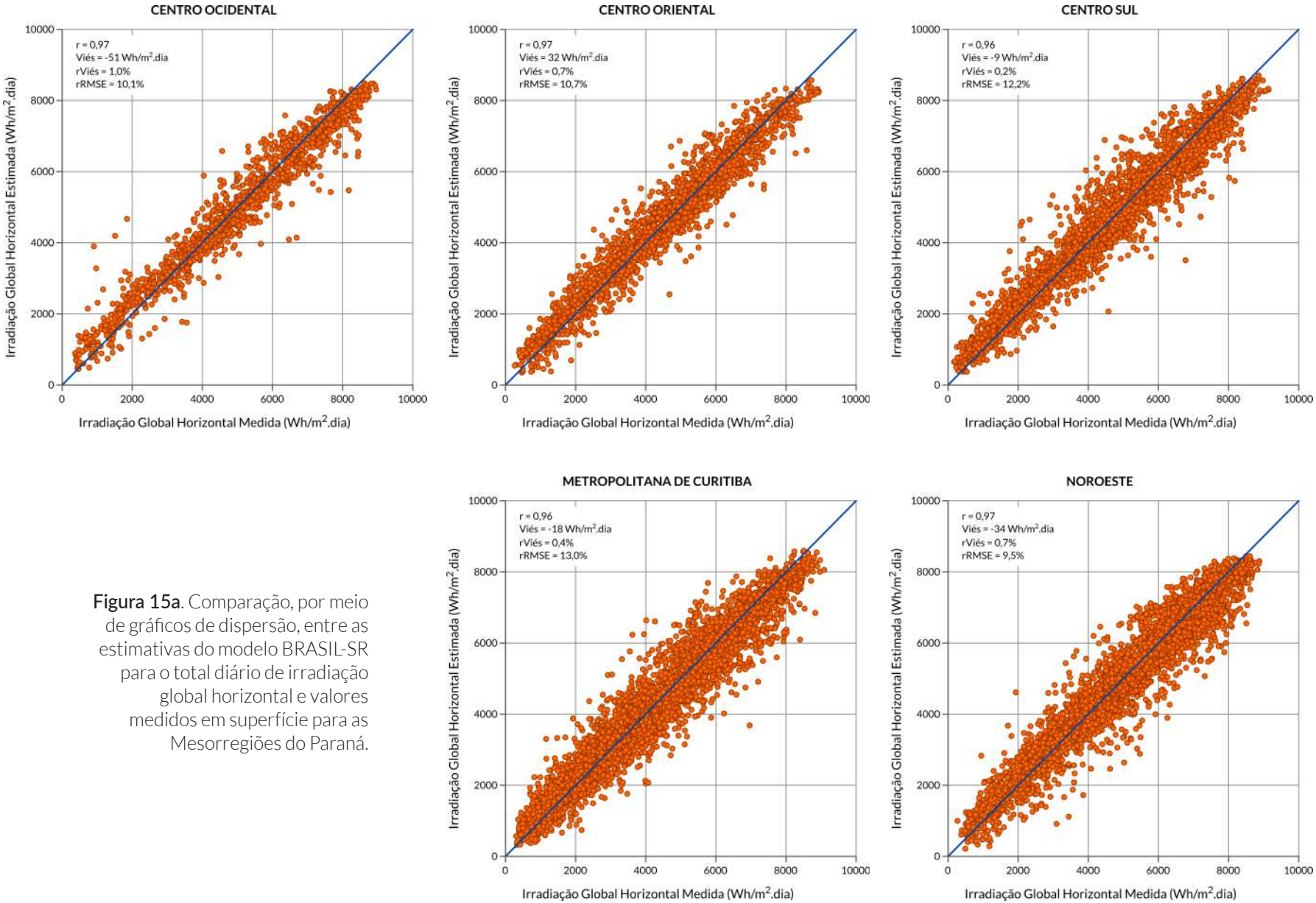


Figura 15a. Comparação, por meio de gráficos de dispersão, entre as estimativas do modelo BRASIL-SR para o total diário de irradiação global horizontal e valores medidos em superfície para as Mesorregiões do Paraná.

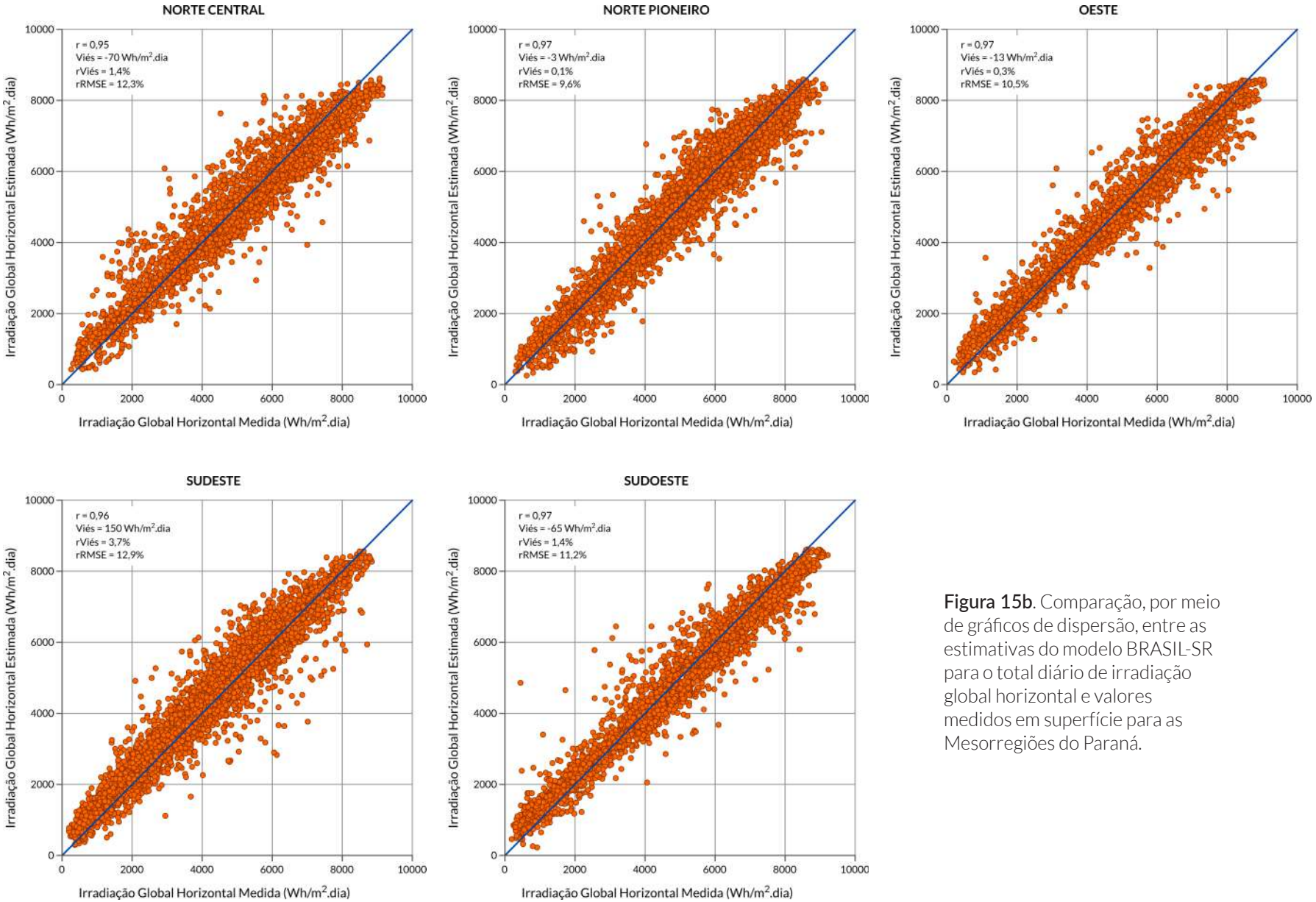


Figura 15b. Comparação, por meio de gráficos de dispersão, entre as estimativas do modelo BRASIL-SR para o total diário de irradiação global horizontal e valores medidos em superfície para as Mesorregiões do Paraná.

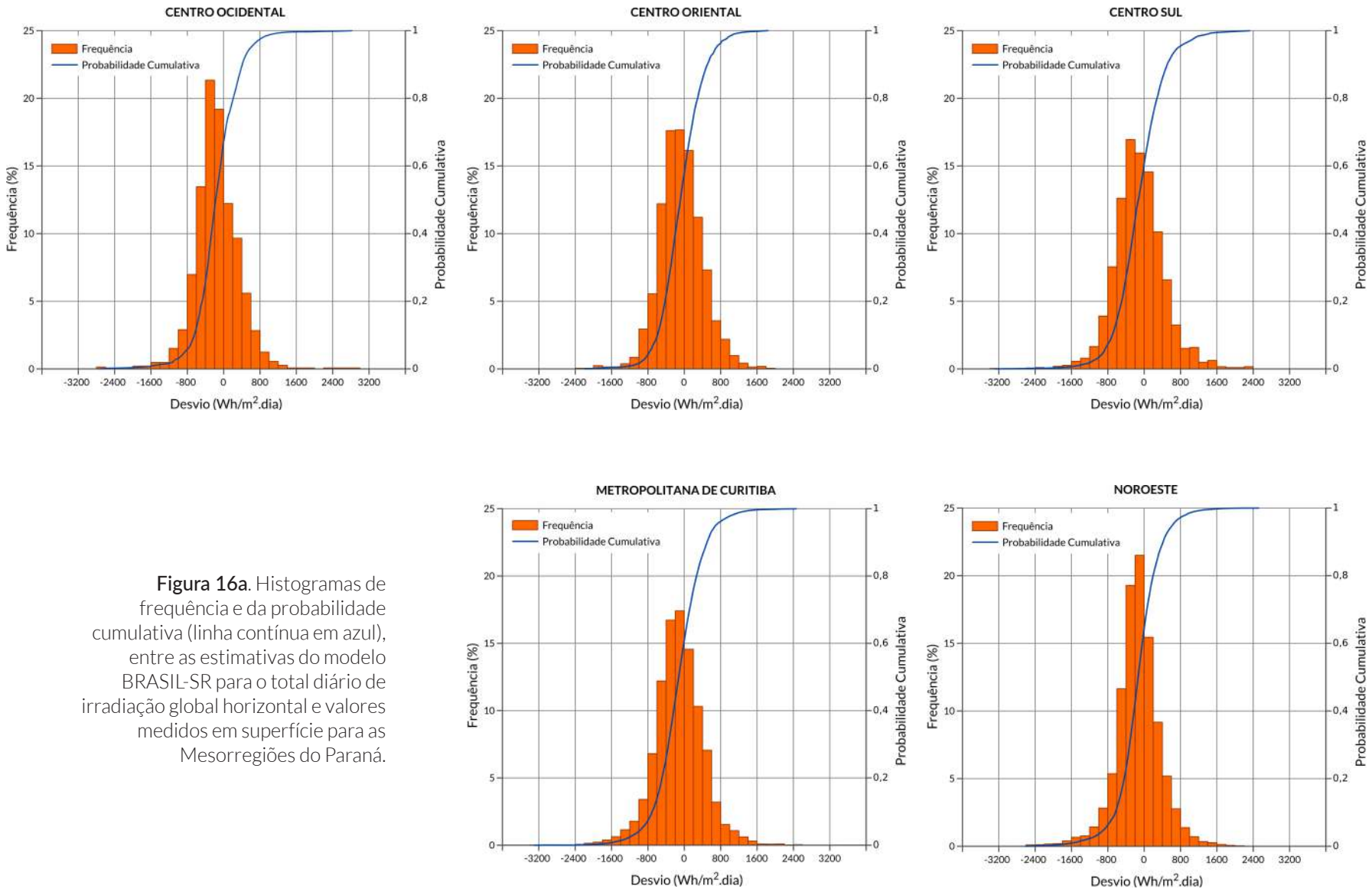


Figura 16a. Histogramas de frequência e da probabilidade cumulativa (linha contínua em azul), entre as estimativas do modelo BRASIL-SR para o total diário de irradiação global horizontal e valores medidos em superfície para as Mesorregiões do Paraná.

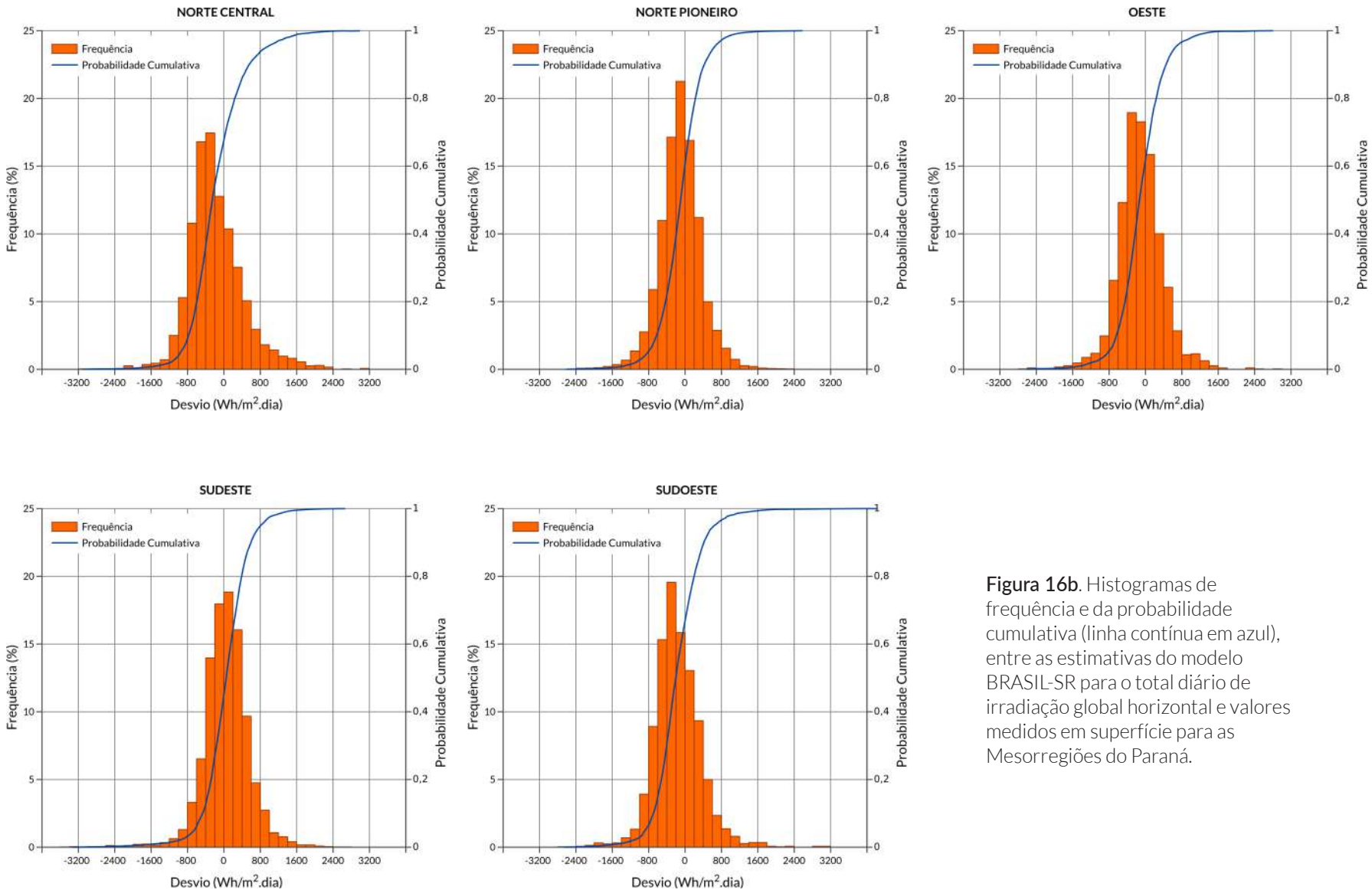


Figura 16b. Histogramas de frequência e da probabilidade cumulativa (linha contínua em azul), entre as estimativas do modelo BRASIL-SR para o total diário de irradiação global horizontal e valores medidos em superfície para as Mesorregiões do Paraná.

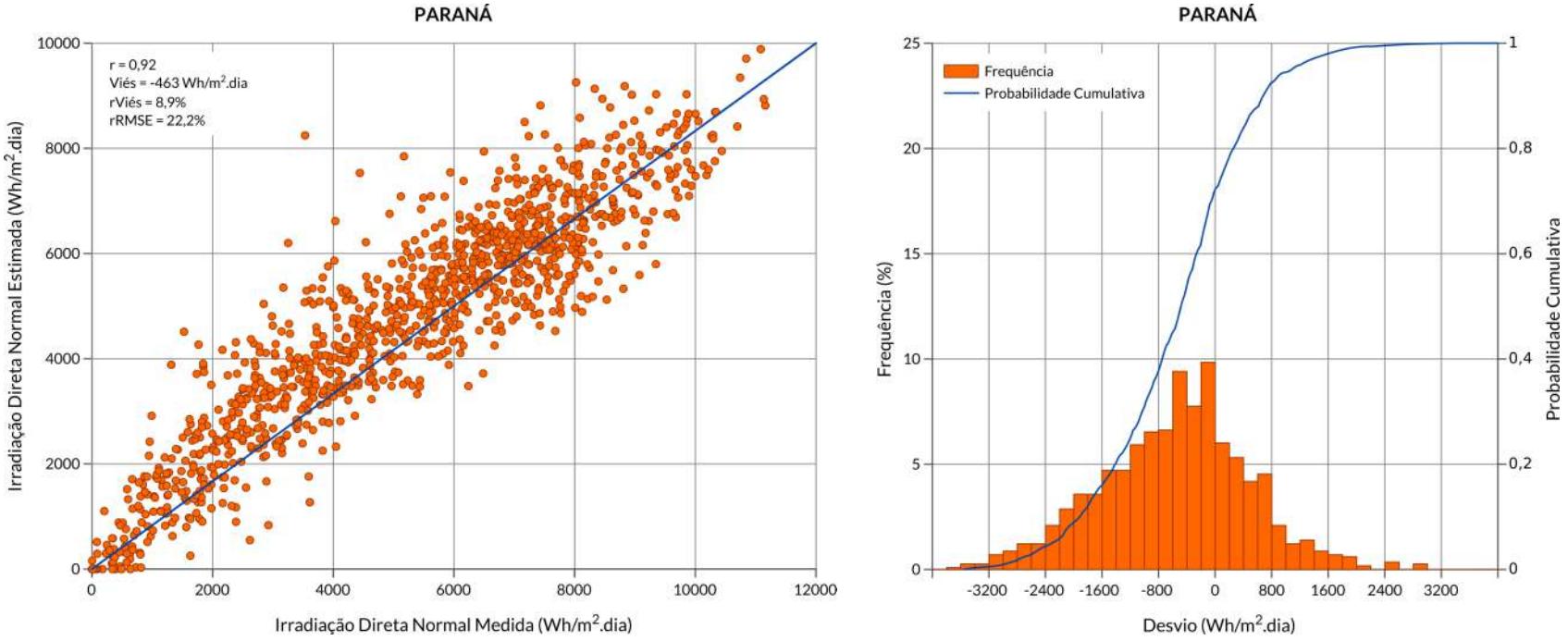


Figura 17. Comparação, através de gráficos de dispersão e histograma, entre as estimativas do modelo BRASIL-SR para o total diário de irradiação direta normal e valores medidos em superfície para o Estado do Paraná.

MAPAS DE IRRADIAÇÃO E DE PRODUTIVIDADE

Para visualização da distribuição da radiação solar no Estado do Paraná foram elaborados: mapas anuais, mensais e sazonais de irradiação global horizontal e no plano inclinado na latitude; mapas anuais e sazonais de irradiação direta normal e difusa. Estes mapas apresentam as seguintes informações:

- Global horizontal: irradiação incidente em uma superfície no plano horizontal, constituída pela soma das irradiações direta e difusa;
- Direta normal: irradiação incidente em uma superfície perpendicular ao feixe da radiação direta, cuja superfície deve estar acoplada a um dispositivo que acompanhe o movimento do Sol, normalmente denominado de seguidor ou rastreador solar;
- Difusa: irradiação incidente em uma superfície no plano horizontal excluindo-se a irradiação direta, com o auxílio de um dispositivo de sombreamento;
- Inclinado na latitude: irradiação incidente em uma superfície com inclinação igual à latitude do local, orientada para o Norte geográfico, constituída pela soma das irradiações direta, difusa e devido ao albedo.

Os mapas gerados fornecem informações importantes que podem ser utilizadas em diversas aplicações da radiação solar.

A partir da irradiação global horizontal, determinados *softwares* (como o Radiasol da UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul) possibilitam estimar a irradiação em diferentes inclinações e orientações para diversas aplicações da energia solar. Exemplos desse ajuste são encontrados em projetos de coletores solares e sistemas fotovoltaicos isolados, cujas aplicações possuem inclinação que privilegiam a máxima incidência solar durante o inverno. Da mesma forma, em SFVCR, cuja orientação e/ou inclinação do painel forem diferentes das consideradas ideais para se obter o máximo de irradiação ao longo do ano em uma superfície fixa, característica típica das instalações residenciais onde o SFVCR normalmente é aplicado sobre uma cobertura pré-existente.

A principal aplicação dos mapas de irradiação no plano inclinado na latitude são projetos de SFVCR em que os painéis serão instalados nas condições ideais de geração de energia elétrica, ou seja: instalados com orientação para o Norte geográfico (por estarem no hemisférico Sul), com inclinação igual à latitude do local e sem sombreamento. Estas informações de irradiação estão prontas nos mapas, sem a necessidade de ajustes. Especificamente nesses mapas, são também apresentados os valores estimados de produtividade.

Forma análoga ocorre para os mapas de irradiação direta normal, cujas informações são utilizadas, principalmente, em projetos heliotérmicos, também conhecidos como *Concentrating Solar Power* (CSP). Nesses sistemas, cujo princípio de funcionamento baseia-se em utilizar o acúmulo do calor proveniente dos raios solares, normalmente espelhos são usados para refletir a luz solar e concentrá-la em um único ponto (receptor), fazendo com que grande

quantidade de calor seja acumulada. Este calor gerado pode ser usado para produzir eletricidade ou em processos industriais que demandem altas temperaturas.

Quanto aos mapas de irradiação difusa, esses não possuem uma aplicação específica de utilização. Porém, mostram, indiretamente, regiões onde o índice de nebulosidade é maior e, portanto, possuem uma menor incidência de irradiação direta na superfície. Estas informações são importantes, como exemplo, no desenvolvimento de pesquisas associadas à escolha da melhor tecnologia de módulo fotovoltaico a ser utilizada, pois estudos em andamento sugerem que em lugares com maior incidência de irradiação difusa determinadas tecnologias possuem desempenho melhor em detrimento de outras.

PRODUTIVIDADE ESTIMADA EM SFVCR

A produtividade representa a quantidade de energia elétrica que um SFVCR é capaz de produzir para cada 1 kWp (quilowatt-pico) de potência instalada, sendo que o valor máximo ao longo do ano é obtido quando o painel fotovoltaico é instalado nas condições consideradas ideais de geração, ou seja: com inclinação igual à latitude do local, orientado para o Norte geográfico (no caso do hemisfério Sul), sem sombreamento e com uma taxa de desempenho estabelecida (também conhecida como *Performance Ratio*).

A taxa de desempenho representa o percentual de energia elétrica que efetivamente é disponibilizada pelo SFVCR no ponto de conexão com a rede elétrica, excluindo-se as perdas existentes. Estas perdas podem ser oriundas de: índice de sujidade sobre o painel fotovoltaico; temperatura no painel; descasamento das características elétricas entre os módulos; perdas ôhmicas em cabos e conectores, tanto no lado de corrente contínua como de corrente alternada; eficiência do inversor; sombreamento parcial; desligamentos da rede elétrica, entre outros.

Neste Atlas adotou-se uma taxa de desempenho conservadora de 75% para determinação da produtividade, valor este utilizado internacionalmente na elaboração de mapas fotovoltaicos. Entretanto cabe salientar que projetos de SFVCR dimensionados corretamente, utilizando equipamentos de boa qualidade e certificados, podem obter taxas de desempenho com valores próximos a 80% e, em alguns casos, até superiores. Pesquisas recentes desenvolvidas na UTFPR, onde foram avaliados SFVCR instalados na região Metropolitana de Curitiba, mostraram que projetos bem elaborados, com conectores de boa qualidade e inversores certificados de alta eficiência, instalados em coberturas que se apresentam nas condições ótimas ou muito próximas das consideradas ideais, obtiveram taxas de desempenho entre 80% e 85% [57].

A partir do valor de produtividade encontrado no mapa de irradiação no plano inclinado na latitude, pode-se obter o valor estimado de energia elétrica a ser gerada por um SFVCR para qualquer potência e tecnologia, para esta mesma taxa de desempenho. Para isso, basta multiplicar o valor da produtividade encontrado no mapa, pela potência em kWp (quilowatt-pico) do SFVCR instalado ou que se pretende instalar. No mapa anual, este valor corresponde ao total de energia elétrica que o SFVCR deverá gerar ao longo do ano, de acordo com a sua potência. Nos mapas mensais de irradiação e de produtividade, o resultado encontrado deverá ser ainda multiplicado pelo número de dias do mês analisado, obtendo-se então a quantidade de energia elétrica mensal estimada que o SFVCR deverá gerar.

ESCALA ADOTADA

A escala adotada nos mapas gerados é derivada de pesquisas já realizadas [20] e possibilita visualizar uma ampla gama de cores e de valores que representam os diferentes níveis de irradiação solar no estado, em todas as suas componentes. Ao mesmo tempo permite a comparação direta com mapas elaborados pela Comissão Europeia que também utiliza o mesmo padrão.

Neste Atlas optou-se por utilizar, basicamente, dois tipos de escala: uma contendo valores anuais, que possibilita a comparação com mapas internacionais com valores acumulados no ano e outra contendo valores diários médios, utilizada nos mapas mensais e sazonais.

A escala apresenta, do lado esquerdo, valores de irradiação e, no direito, valores de produtividade (apenas para o plano inclinado na latitude). As escalas diárias e anuais são apresentadas na Figura 18.

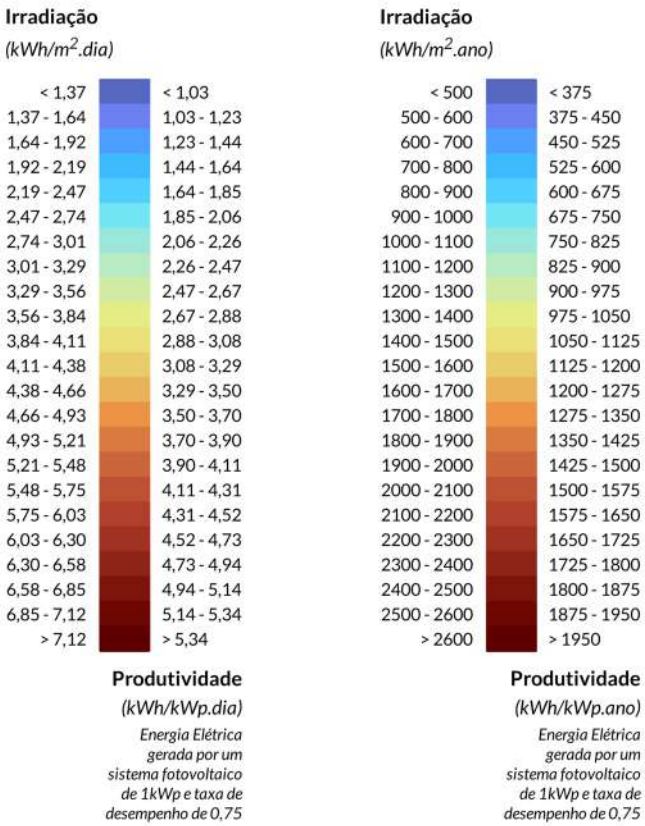


Figura 18. Escala representando os diferentes níveis de irradiação e de produtividade (para o plano inclinado na latitude) com valores diários médios mensais, sazonais e total anual.

LEITURA DOS MAPAS

Este Atlas apresenta na faixa lateral da cada página parte da escala completa com a extensão de valores correspondentes ao intervalo de irradiação (e de produtividade quando no plano inclinado na latitude) encontrados, facilitando o entendimento pelo leitor. No canto superior direito de cada mapa, são apresentados os valores mínimos e máximos existentes de irradiação (e de produtividade quando no plano inclinado na latitude) e a cor correspondente à faixa em que se encontram. Na Figura 19 é apresentado um exemplo de um mapa com a faixa de valores de irradiação e de produtividade correspondentes.

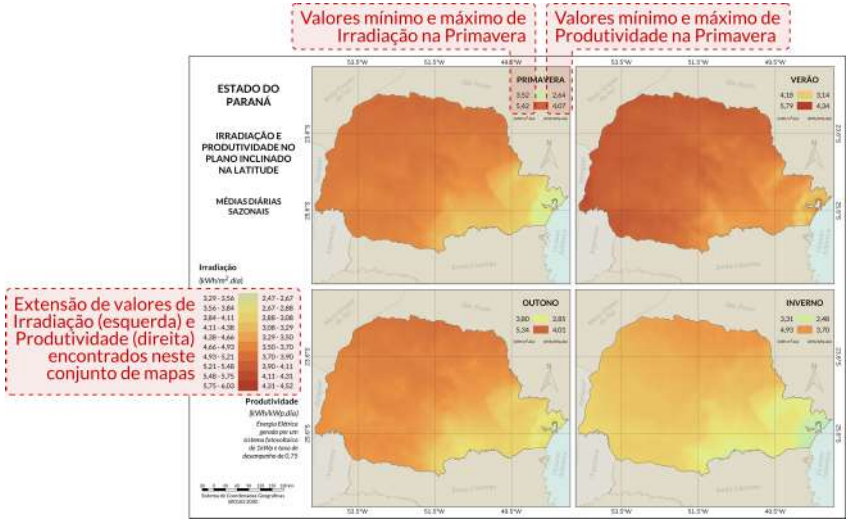


Figura 19. Forma de apresentação e leitura dos mapas de irradiação e produtividade (no plano inclinado na latitude).

Neste Atlas foram utilizados os termos "médias diárias mensais" e "médias diárias sazonais" que representam respectivamente a média mensal do total diário e a média sazonal do total diário da irradiação estimada entre os anos de 1999 a 2015. Da mesma forma, o termo "total anual" representa o total anual médio.

MAPAS DE IRRADIAÇÃO

Todos os mapas de irradiação foram elaborados sobre a base cartográfica do IBGE [36].

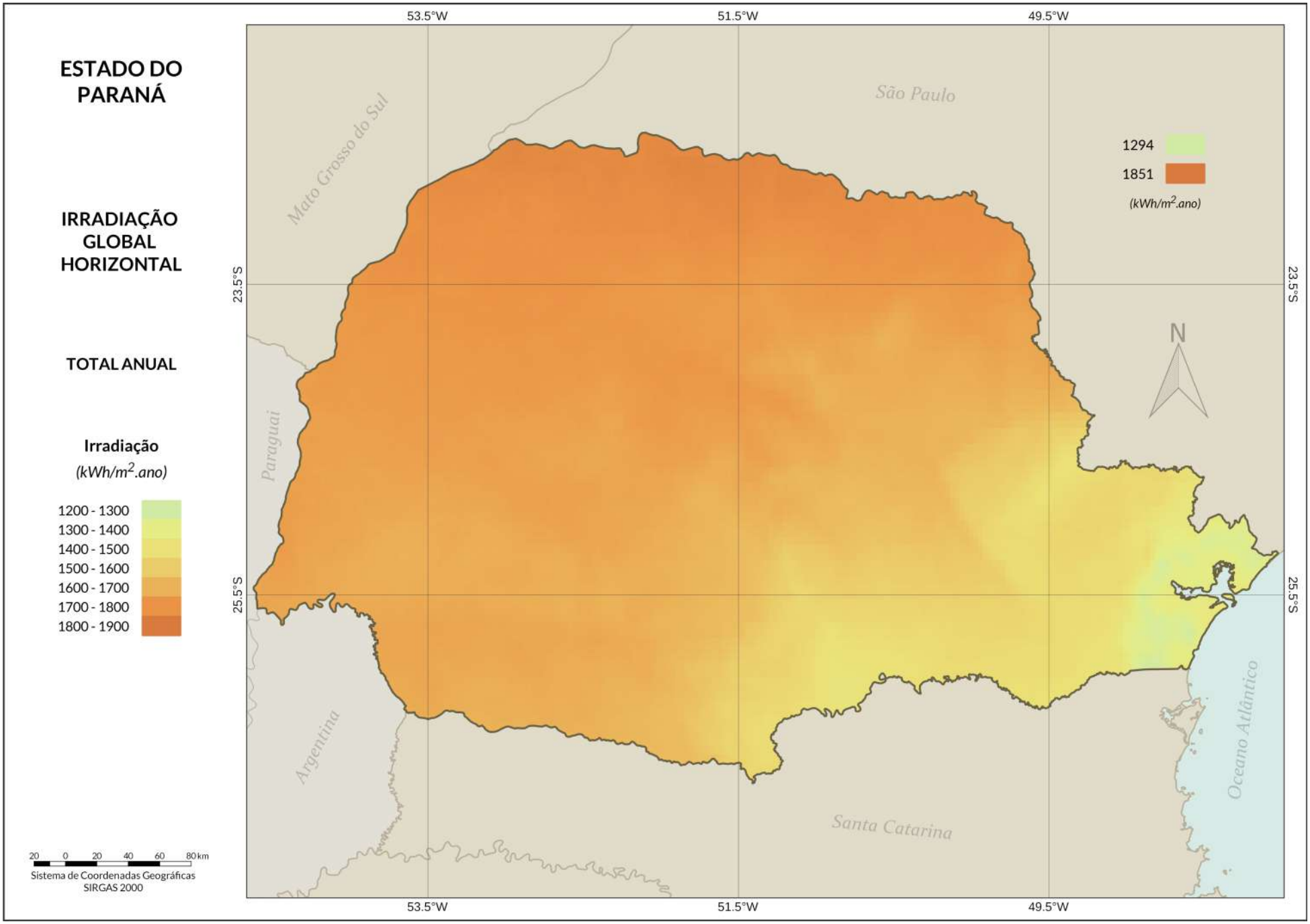
Os mapas com a média diária sazonal classificam os meses do ano nas quatro estações pelo seguinte critério: a Primavera refere-se ao período de setembro a novembro; Verão de dezembro a fevereiro; Outono de março a maio; e Inverno de junho a agosto.

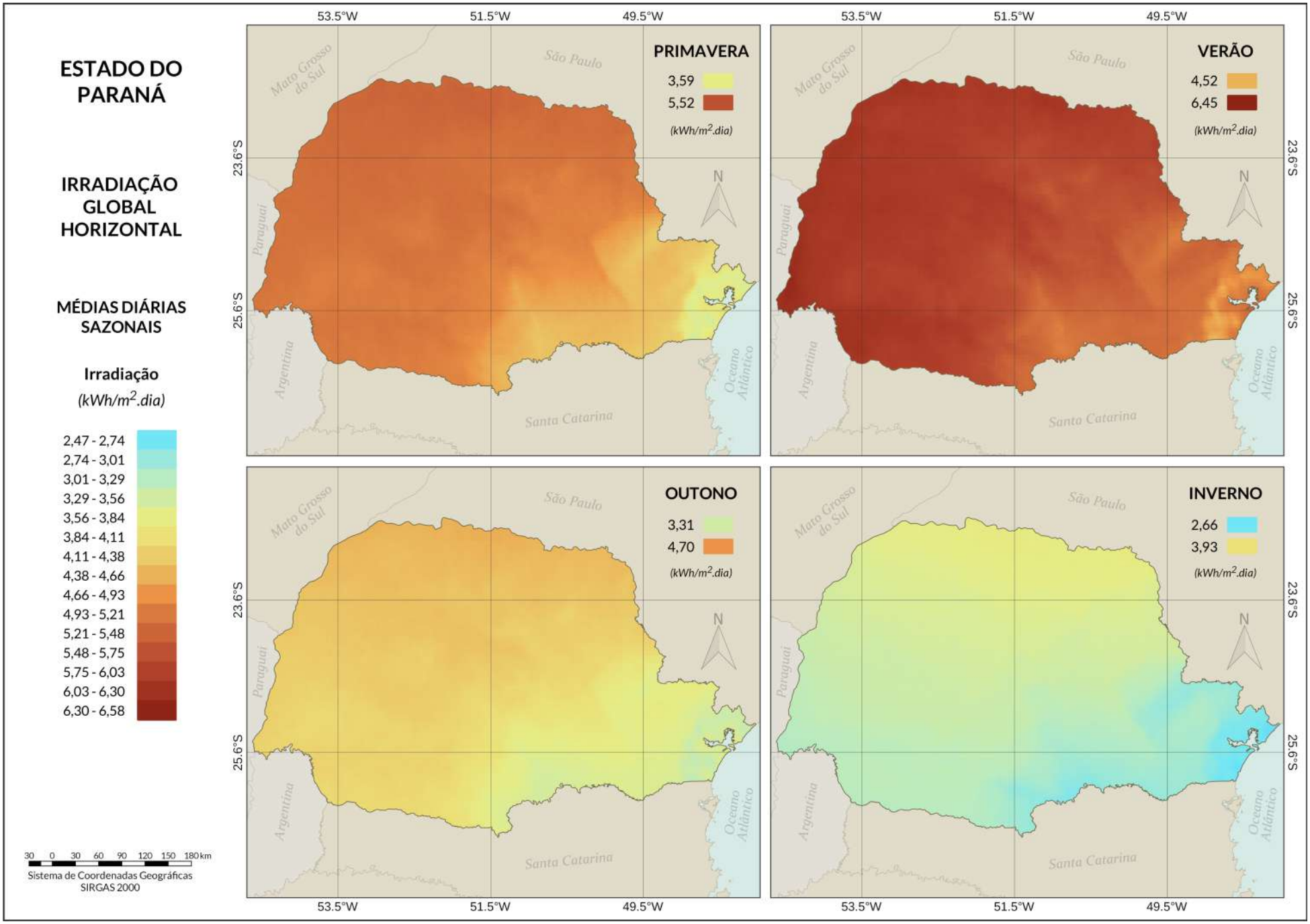
O mapa anual de irradiação global horizontal apresenta como característica a menor incidência de irradiação na região Leste do estado, próximo à Serra do Mar e ao litoral, onde há grande incidência de nebulosidade ao longo do ano. Os maiores valores são encontrados em todo o Norte do estado, principalmente próximo à divisa com o Estado de São Paulo, estendendo-se em direção ao Oeste. Os mapas mensais apresentam características bem definidas quanto à variação da incidência da irradiação ao longo do ano, com os maiores valores diários médios encontrados nos meses de novembro a fevereiro e os menores valores nos meses de maio a julho. Esta característica é evidenciada ao se analisar os mapas sazonais, onde os maiores valores diários médios são encontrados no verão, enquanto os menores valores no período de inverno. Os mapas de irradiação global horizontal anual, média diária mensal e sazonal são apresentados nas páginas 37 a 39.

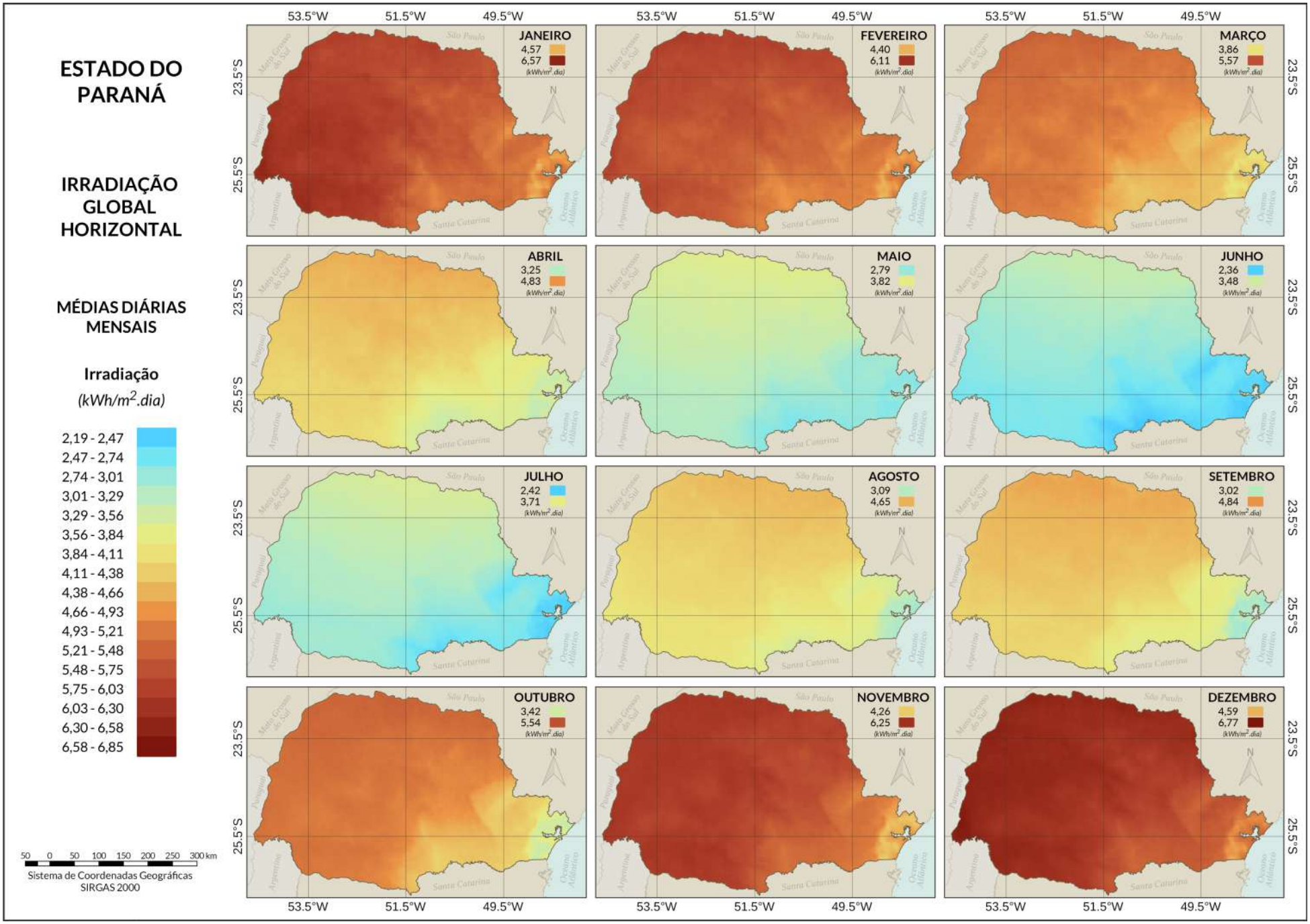
O mapa anual de irradiação direta normal apresenta como característica a menor incidência de irradiação em toda região Leste do estado. Os maiores valores são encontrados na região Noroeste, próximo às divisas com São Paulo e Mato Grosso do Sul, estendendo-se a Oeste e em todo o Norte do estado. Em relação aos mapas sazonais, os maiores valores diários médios são encontrados no verão, principalmente na região Oeste do estado, estendendo-se ao Noroeste e Sudoeste, enquanto os menores valores são encontrados no período de inverno nas regiões Leste e Sudeste do estado. Os mapas de irradiação direta normal anual e média diária sazonal são apresentados nas páginas 40 e 41.

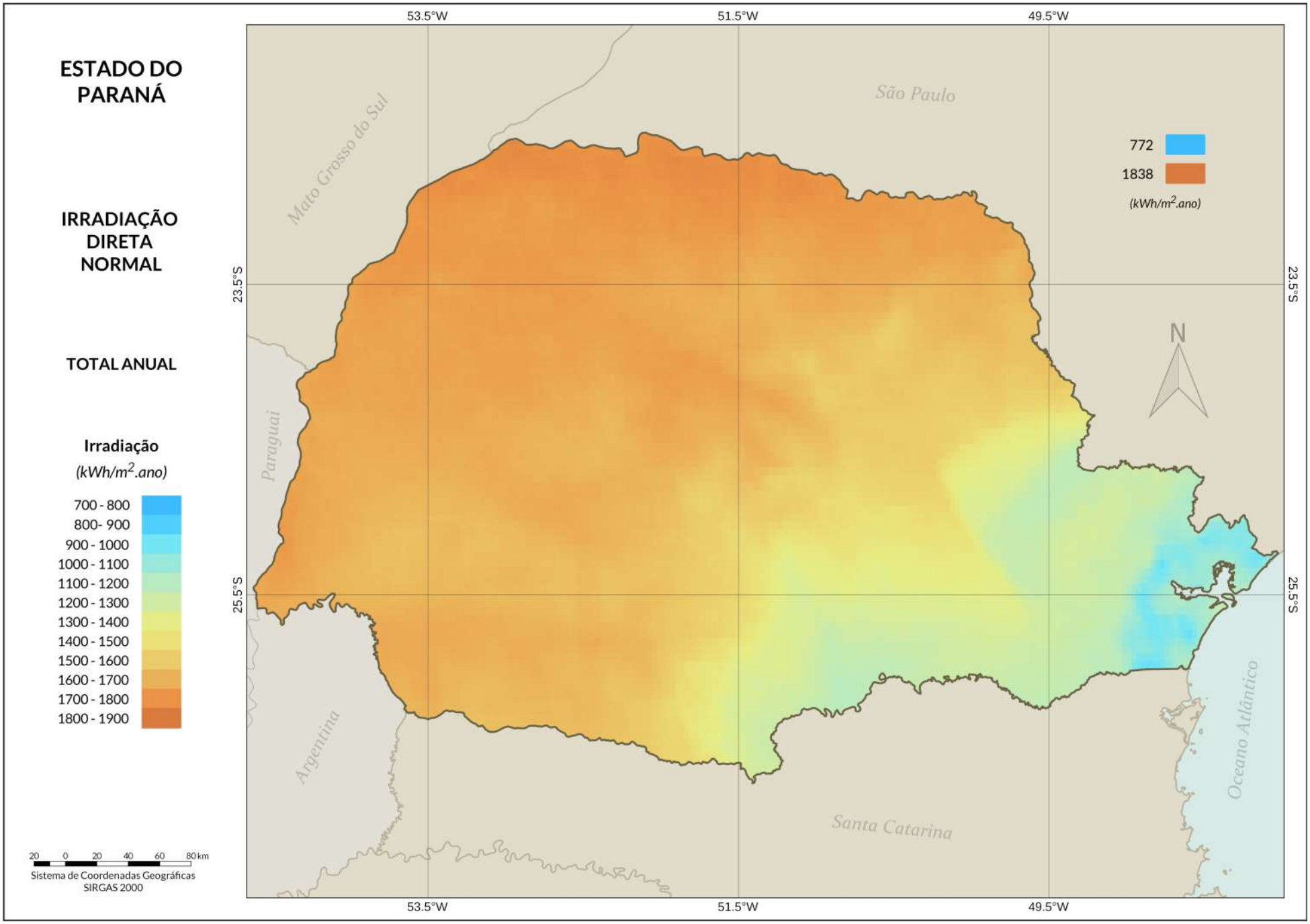
O mapa anual de irradiação difusa apresenta como característica a menor incidência de irradiação na região Oeste do Estado, próximo à divisa com o Paraguai, estendendo-se em direção ao Sudoeste e Noroeste, sendo os maiores valores encontrados em grande parte da região Leste do estado. Em relação aos mapas sazonais, os maiores valores diários médios são encontrados no verão, principalmente na região Leste do estado e caracterizado por dias de maior nebulosidade, enquanto os menores valores são encontrados no período de inverno nas regiões Sudoeste e Oeste do estado, estação com predominância de dias de céu claro. Os mapas de irradiação difusa anual e média diária sazonal são apresentados nas páginas 42 e 43.

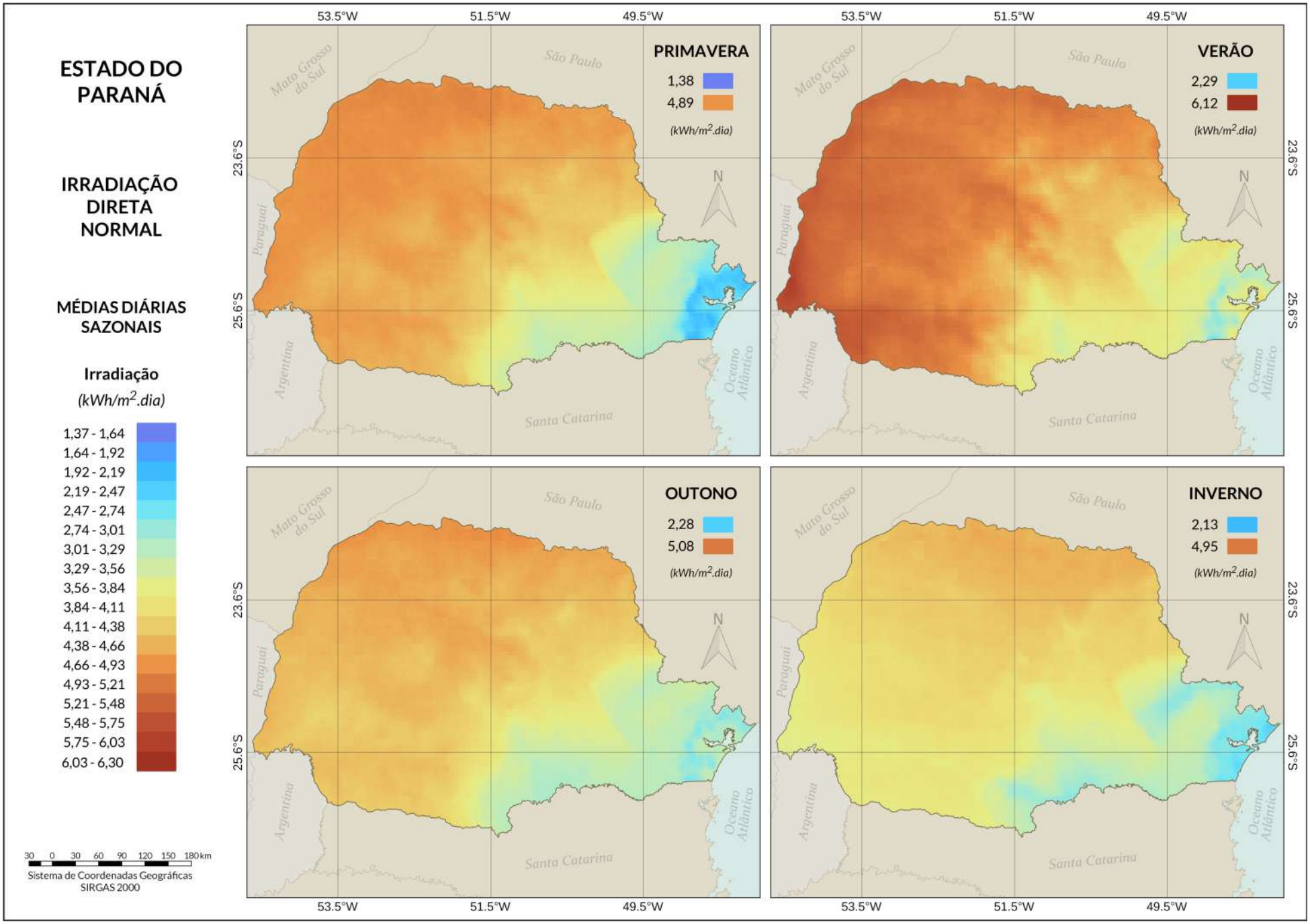
A irradiação e produtividade no plano inclinado na latitude e seus respectivos mapas são apresentados a partir da página 44.

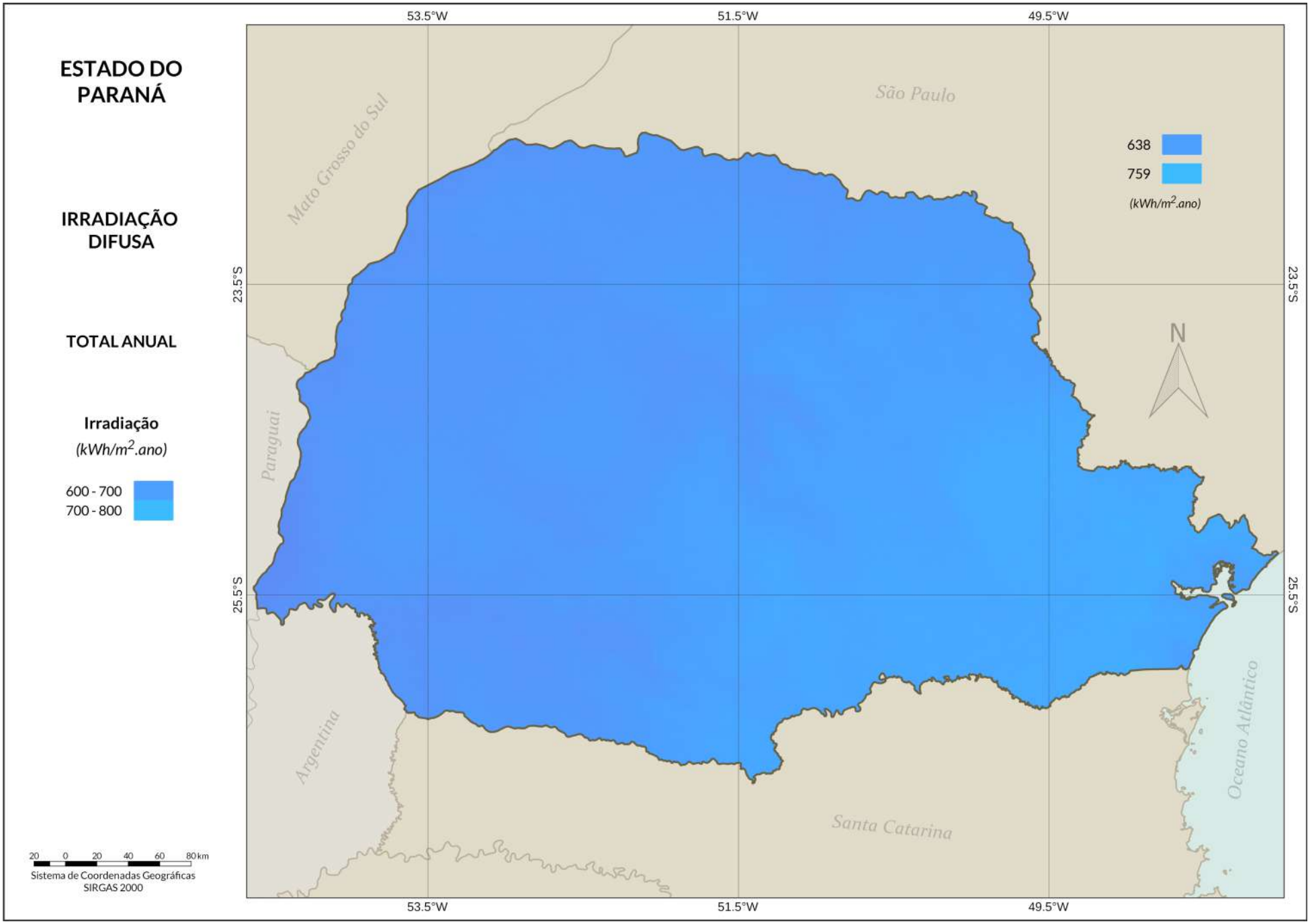

ESTADO DO PARANÁ
IRRADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL
TOTAL ANUAL
Irradiação
(kWh/m2.ano)
1200 - 1300
1300 - 1400
1400 - 1500
1500 - 1600
1600 - 1700
1700 - 1800
1800 - 1900
1294
1851
(kWh/m2.ano)
53.5°W
51.5°W
49.5°W
23.5°S
25.5°S
São Paulo
Mato Grosso do Sul
Paraguai
Argentina
Santa Catarina
Oceano Atlântico
N
20 0 20 40 60 80 km
Sistema de Coordenadas Geográficas
SIRGAS 2000

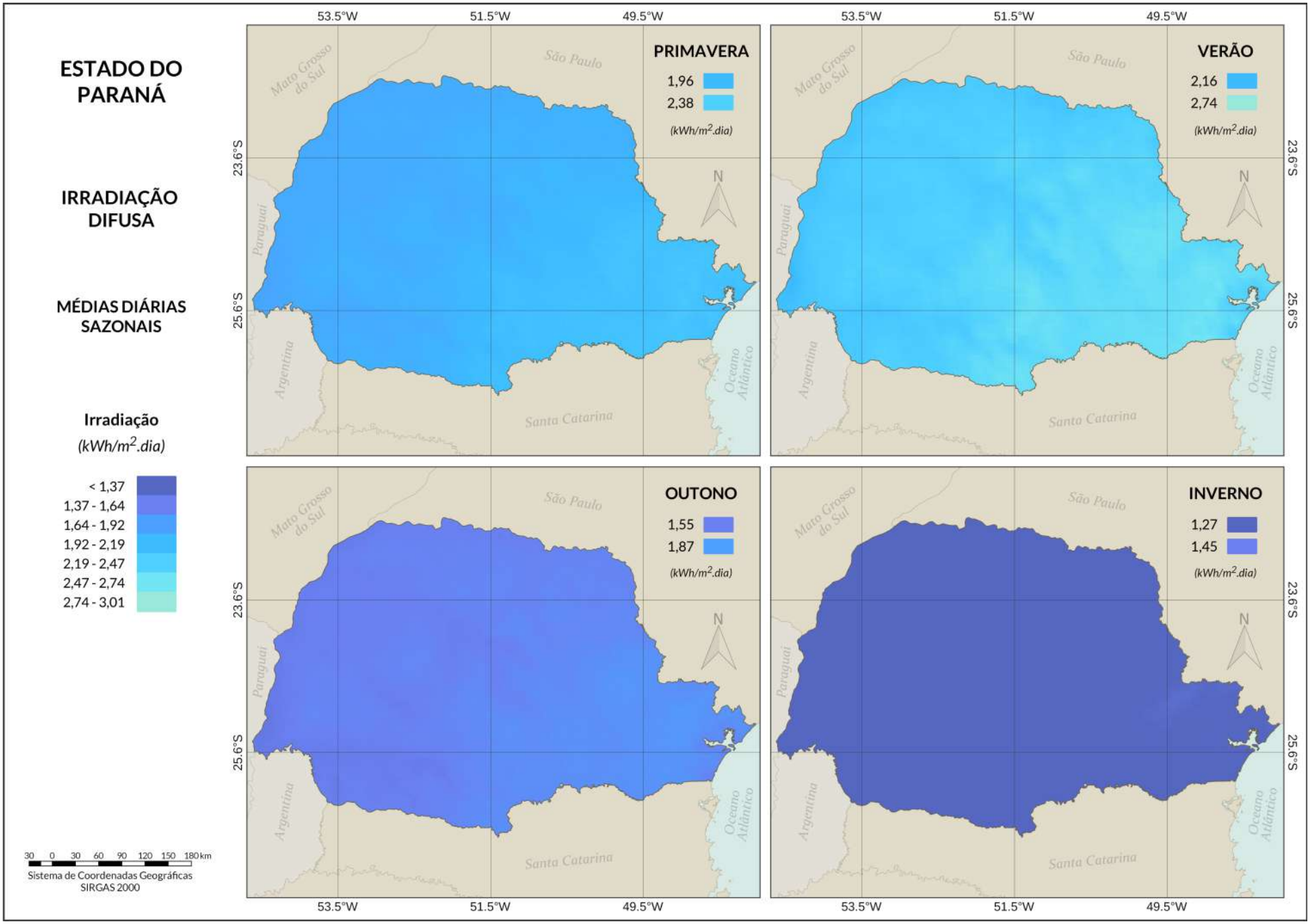

ESTADO DO PARANÁ
IRRADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL
MÉDIAS DIÁRIAS SAZONAIS
Irradiação
(kWh/m2.dia)
2,47 - 2,74
2,74 - 3,01
3,01 - 3,29
3,29 - 3,56
3,56 - 3,84
3,84 - 4,11
4,11 - 4,38
4,38 - 4,66
4,66 - 4,93
4,93 - 5,21
5,21 - 5,48
5,48 - 5,75
5,75 - 6,03
6,03 - 6,30
6,30 - 6,58
30 0 30 60 90 120 150 180 km
Sistema de Coordenadas Geográficas
SIRGAS 2000
53.5°W
51.5°W
49.5°W
23.6°S
25.6°S
PRIMAVERA
3,59
5,52
(kWh/m2.dia)
VERÃO
4,52
6,45
(kWh/m2.dia)
OUTONO
3,31
4,70
(kWh/m2.dia)
INVERNO
2,66
3,93
(kWh/m2.dia)
N
Mato Grosso do Sul
São Paulo
Paraguai
Argentina
Santa Catarina
Oceano Atlântico


ESTADO DO PARANÁ
IRRADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL
MÉDIAS DIÁRIAS MENSAIS
Irradiação
(kWh/m2.dia)
2,19 - 2,47
2,47 - 2,74
2,74 - 3,01
3,01 - 3,29
3,29 - 3,56
3,56 - 3,84
3,84 - 4,11
4,11 - 4,38
4,38 - 4,66
4,66 - 4,93
4,93 - 5,21
5,21 - 5,48
5,48 - 5,75
5,75 - 6,03
6,03 - 6,30
6,30 - 6,58
6,58 - 6,85
50 0 50 100 150 200 250 300 km
Sistema de Coordenadas Geográficas
SIRGAS 2000
53.5°W
51.5°W
49.5°W
23.5°S
25.5°S
JANEIRO 4,57 6,57
FEVEREIRO 4,40 6,11
MARÇO 3,86 5,57
ABRIL 3,25 4,83
MAIO 2,79 3,82
JUNHO 2,36 3,48
JULHO 2,42 3,71
AGOSTO 3,09 4,65
SETEMBRO 3,02 4,84
OUTUBRO 3,42 5,54
NOVEMBRO 4,26 6,25
DEZEMBRO 4,59 6,77
(kWh/m2.dia)
N
São Paulo
Mato Grosso do Sul
Paraguai
Argentina
Santa Catarina
Oceano Atlântico


ESTADO DO PARANÁ
IRRADIAÇÃO DIRETA NORMAL
TOTAL ANUAL
Irradiação
(kWh/m2.ano)
700 - 800
800- 900
900 - 1000
1000 - 1100
1100 - 1200
1200 - 1300
1300 - 1400
1400 - 1500
1500 - 1600
1600 - 1700
1700 - 1800
1800 - 1900
20 0 20 40 60 80 km
Sistema de Coordenadas Geográficas
SIRGAS 2000
53.5°W
51.5°W
49.5°W
23.5°S
25.5°S
São Paulo
Mato Grosso do Sul
Paraguai
Argentina
Santa Catarina
Oceano Atlântico
772
1838
(kWh/m2.ano)
N


ESTADO DO PARANÁ
IRRADIAÇÃO DIRETA NORMAL
MÉDIAS DIÁRIAS SAZONAIS
Irradiação
(kWh/m2.dia)
1,37 - 1,64
1,64 - 1,92
1,92 - 2,19
2,19 - 2,47
2,47 - 2,74
2,74 - 3,01
3,01 - 3,29
3,29 - 3,56
3,56 - 3,84
3,84 - 4,11
4,11 - 4,38
4,38 - 4,66
4,66 - 4,93
4,93 - 5,21
5,21 - 5,48
5,48 - 5,75
5,75 - 6,03
6,03 - 6,30
30 0 30 60 90 120 150 180 km
Sistema de Coordenadas Geográficas
SIRGAS 2000
53.5°W
51.5°W
49.5°W
23.6°S
25.6°S
PRIMAVERA
1,38
4,89
(kWh/m2.dia)
VERÃO
2,29
6,12
(kWh/m2.dia)
OUTONO
2,28
5,08
(kWh/m2.dia)
INVERNO
2,13
4,95
(kWh/m2.dia)
N
Mato Grosso do Sul
São Paulo
Paraguai
Argentina
Santa Catarina
Oceano Atlântico


ESTADO DO PARANÁ
IRRADIAÇÃO DIFUSA
TOTAL ANUAL
Irradiação
(kWh/m2.ano)
600 - 700
700 - 800
638
759
(kWh/m2.ano)
53.5°W
51.5°W
49.5°W
23.5°S
25.5°S
São Paulo
Mato Grosso do Sul
Paraguai
Argentina
Santa Catarina
Oceano Atlântico
N
20 0 20 40 60 80 km
Sistema de Coordenadas Geográficas
SIRGAS 2000


ESTADO DO PARANÁ
IRRADIAÇÃO DIFUSA
MÉDIAS DIÁRIAS SAZONAIS
Irradiação
(kWh/m2.dia)
< 1,37
1,37 - 1,64
1,64 - 1,92
1,92 - 2,19
2,19 - 2,47
2,47 - 2,74
2,74 - 3,01
PRIMAVERA
1,96
2,38
(kWh/m2.dia)
VERÃO
2,16
2,74
(kWh/m2.dia)
OUTONO
1,55
1,87
(kWh/m2.dia)
INVERNO
1,27
1,45
(kWh/m2.dia)
53.5°W
51.5°W
49.5°W
23.6°S
25.6°S
N
Mato Grosso do Sul
São Paulo
Paraguai
Argentina
Santa Catarina
Oceano Atlântico
30 0 30 60 90 120 150 180 km
Sistema de Coordenadas Geográficas
SIRGAS 2000

MAPAS DE IRRADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE

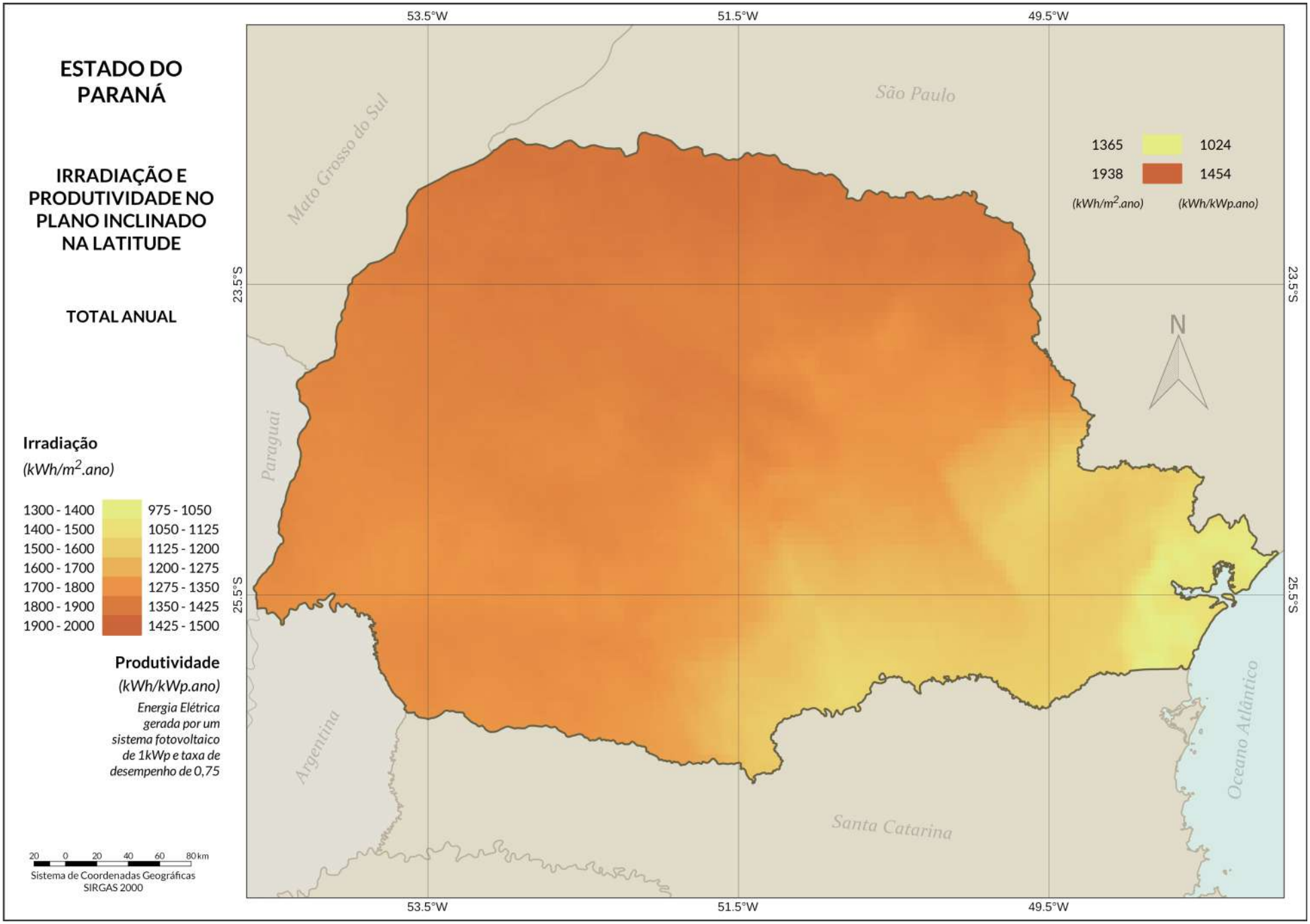
O mapa anual de irradiação e produtividade no plano inclinado na latitude apresenta como característica a menor incidência de irradiação principalmente na região Leste, estendendo-se ao Sudeste do estado. Os maiores valores são encontrados em todo o Norte do estado, principalmente próximo à divisa com o Estado de São Paulo, estendendo-se em direção ao Oeste do estado. Em relação aos mapas mensais, estes apresentam características muito diferentes em relação aos apresentados no plano horizontal. Por esta irradiação ser incidente em um plano cuja inclinação é igual à latitude do local, os valores se apresentam elevados durante os meses entre agosto a abril, sendo menores apenas entre maio a julho, fazendo com que a média anual seja superior à encontrada no plano horizontal. Esta característica é evidenciada ao se analisar os mapas sazonais, pois os maiores valores diários médios são encontrados no verão (menores que os apresentados na mesma estação do ano no plano horizontal), enquanto os menores valores estão no período de inverno, ainda assim superiores aos apresentados durante a mesma estação no plano horizontal. Os mapas de irradiação no plano inclinado anual, média diária mensal e sazonal são apresentados nas páginas 45 a 47.

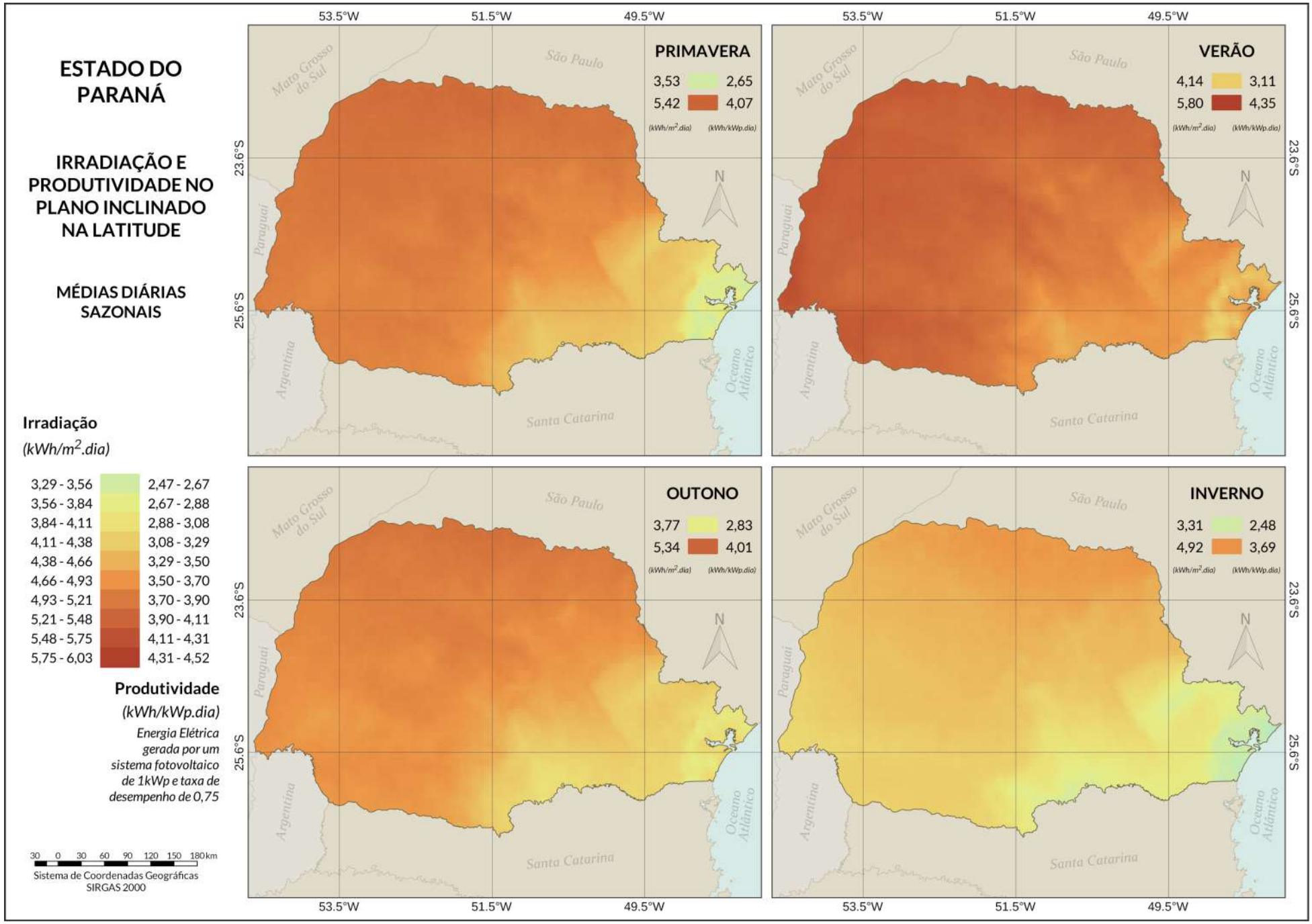
Neste Atlas foram também elaborados mapas anuais e mensais de irradiação e produtividade no plano inclinado na latitude por mesorregião, o que possibilita obter uma visualização mais detalhada visando projetos de SFVCR.

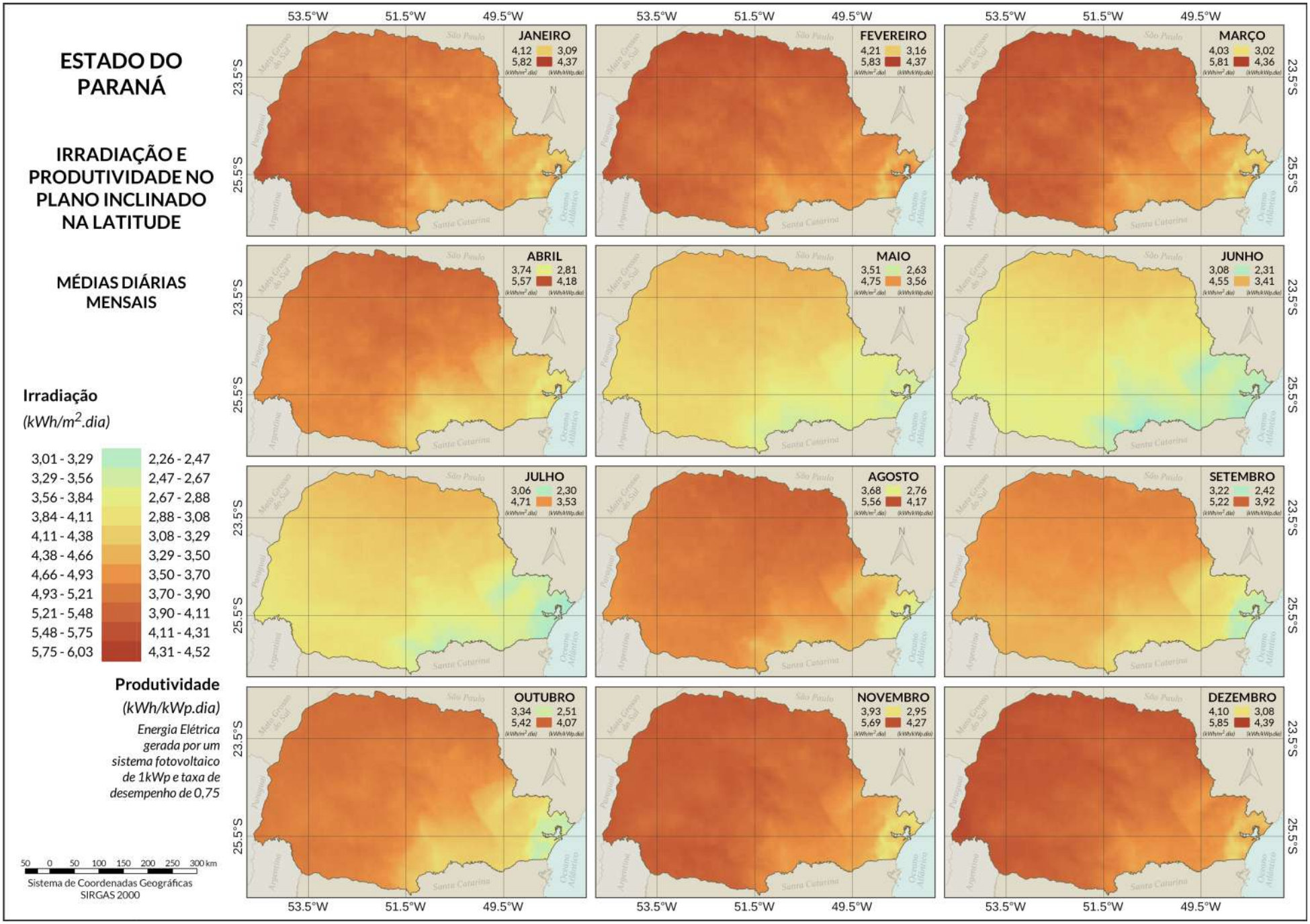
Os mapas anuais no plano inclinado na latitude das mesorregiões do estado apresentam como característica menor variação de irradiação e produtividade no Centro Ocidental, seguida das mesorregiões Noroeste, Norte Central, Oeste e Sudoeste. Da mesma forma, é observada maior variação de irradiação e produtividade nas Mesorregiões Centro Oriental e Centro Sul, estendendo-se em direção a mesorregião Metropolitana de Curitiba.

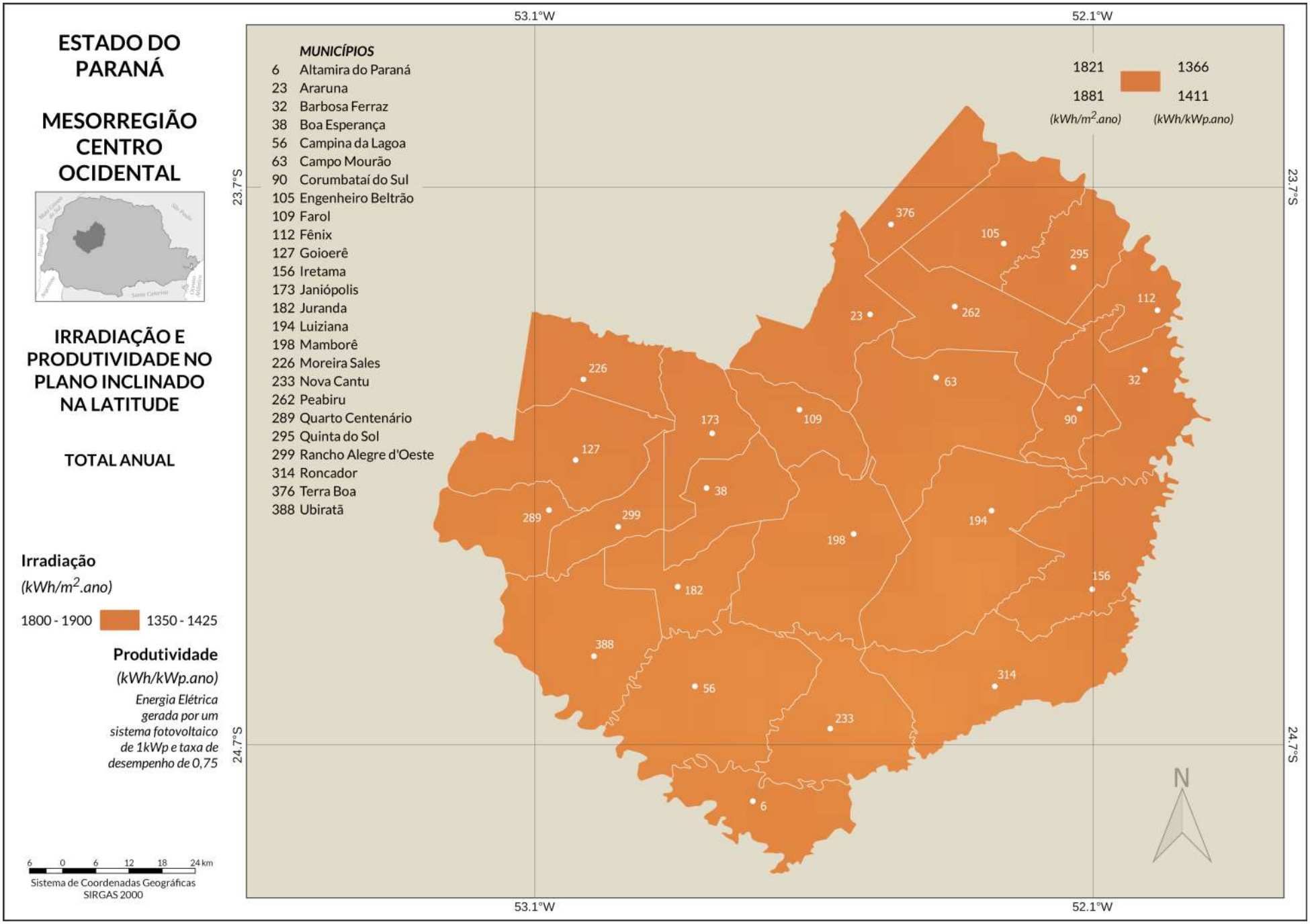
Os mapas mensais no plano inclinado na latitude das mesorregiões do estado, apresentam um detalhamento ainda maior da variação de irradiação e produtividade ao longo do ano, onde também é possível realizar análises quanto a produtividade estimada de um SFVCR nas condições ideais de geração de energia elétrica mês a mês.

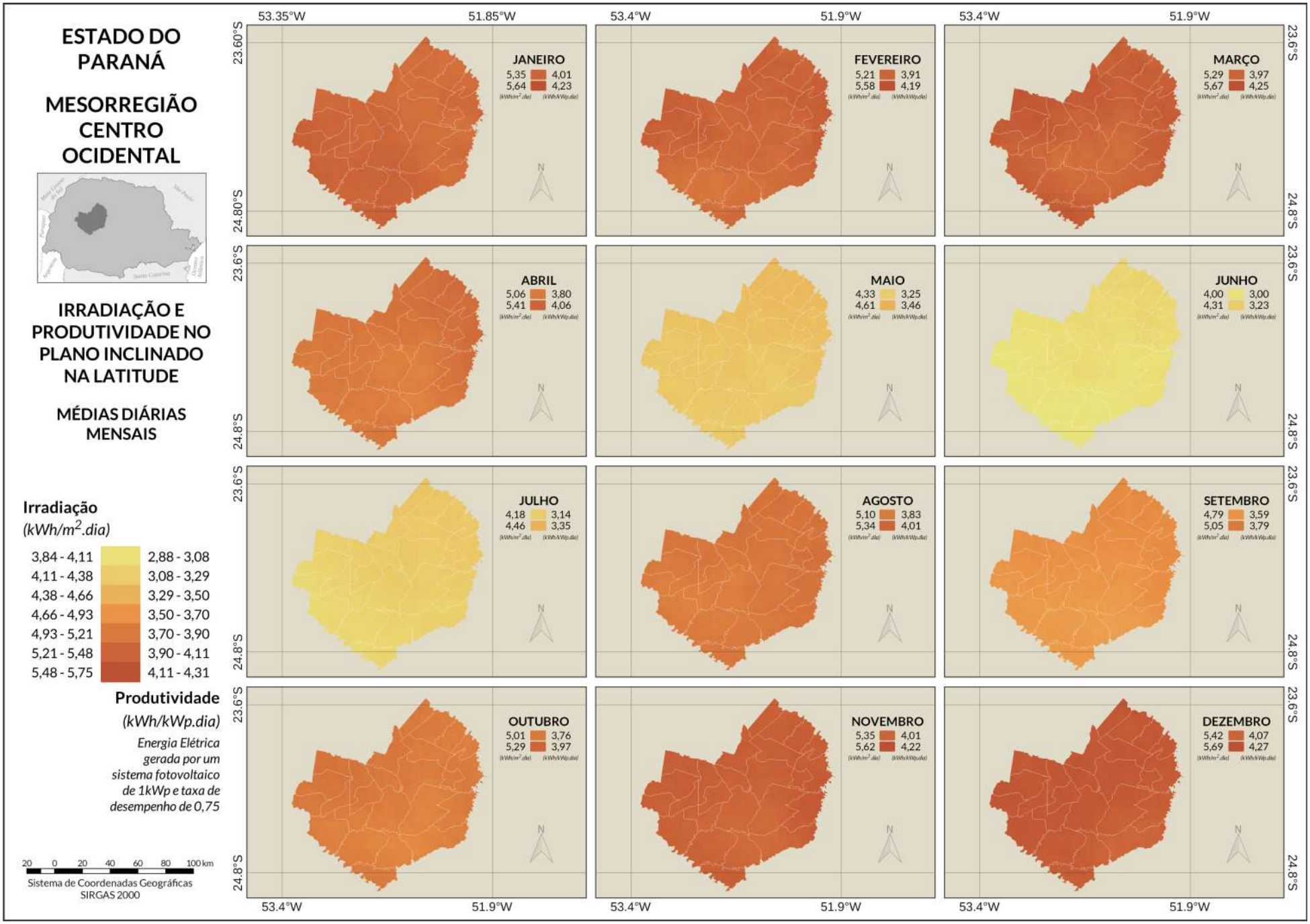
Os mapas de irradiação no plano inclinado anual e média diária mensal das mesorregiões do Estado do Paraná são apresentados nas páginas 48 a 67.

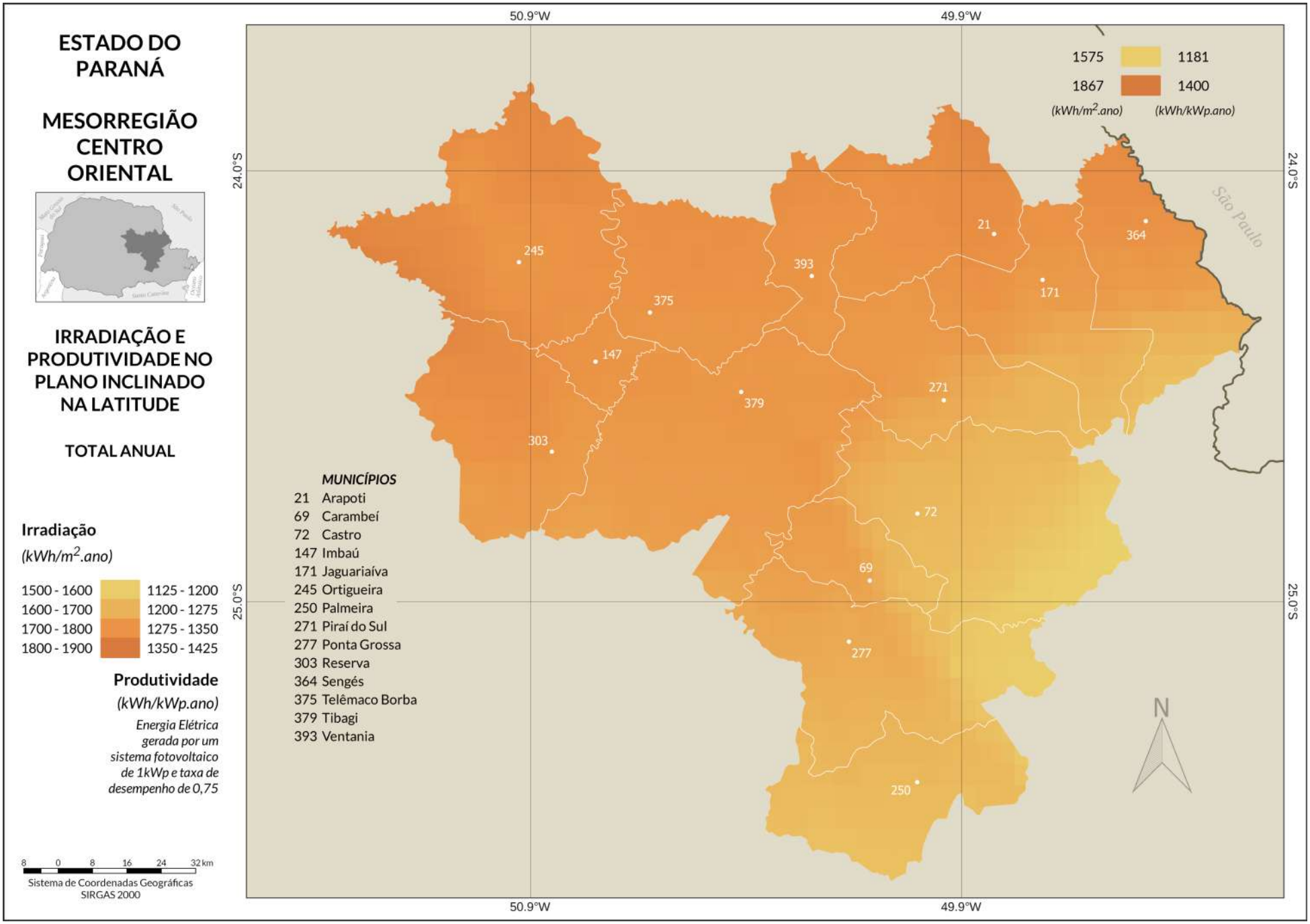

ESTADO DO PARANÁ
IRRADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE NO PLANO INCLINADO NA LATITUDE
TOTAL ANUAL
Irradiação
(kWh/m2.ano)
1300 - 1400
1400 - 1500
1500 - 1600
1600 - 1700
1700 - 1800
1800 - 1900
1900 - 2000
975 - 1050
1050 - 1125
1125 - 1200
1200 - 1275
1275 - 1350
1350 - 1425
1425 - 1500
Produtividade
(kWh/kWp.ano)
Energia Elétrica gerada por um sistema fotovoltaico de 1kWp e taxa de desempenho de 0,75
20 0 20 40 60 80 km
Sistema de Coordenadas Geográficas
SIRGAS 2000
53.5°W
51.5°W
49.5°W
23.5°S
25.5°S
São Paulo
Mato Grosso do Sul
Paraguai
Argentina
Santa Catarina
Oceano Atlântico
1365
1938
(kWh/m2.ano)
1024
1454
(kWh/kWp.ano)
N

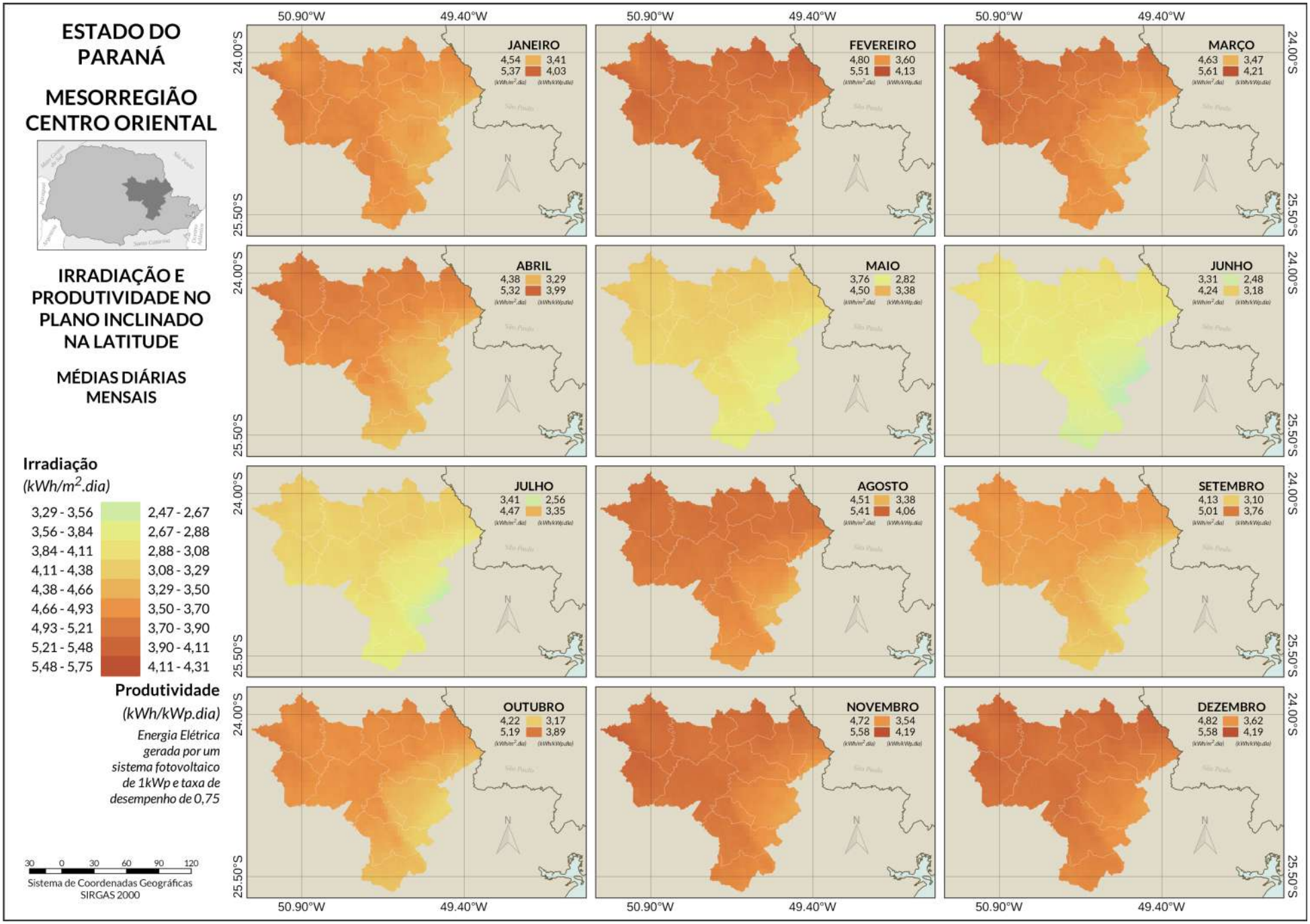

ESTADO DO PARANÁ
IRRADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE NO PLANO INCLINADO NA LATITUDE
MÉDIAS DIÁRIAS SAZONAIS
Irradiação
(kWh/m2.dia)
3,29 - 3,56
3,56 - 3,84
3,84 - 4,11
4,11 - 4,38
4,38 - 4,66
4,66 - 4,93
4,93 - 5,21
5,21 - 5,48
5,48 - 5,75
5,75 - 6,03
2,47 - 2,67
2,67 - 2,88
2,88 - 3,08
3,08 - 3,29
3,29 - 3,50
3,50 - 3,70
3,70 - 3,90
3,90 - 4,11
4,11 - 4,31
4,31 - 4,52
Produtividade
(kWh/kWp.dia)
Energia Elétrica gerada por um sistema fotovoltaico de 1kWp e taxa de desempenho de 0,75
30 0 30 60 90 120 150 180 km
Sistema de Coordenadas Geográficas
SIRGAS 2000
53.5°W
51.5°W
49.5°W
23.6°S
25.6°S
PRIMAVERA
3,53 2,65
5,42 4,07
(kWh/m2.dia) (kWh/kWp.dia)
VERÃO
4,14 3,11
5,80 4,35
(kWh/m2.dia) (kWh/kWp.dia)
OUTONO
3,77 2,83
5,34 4,01
(kWh/m2.dia) (kWh/kWp.dia)
INVERNO
3,31 2,48
4,92 3,69
(kWh/m2.dia) (kWh/kWp.dia)
N
Mato Grosso do Sul
São Paulo
Paraguai
Argentina
Santa Catarina
Oceano Atlântico

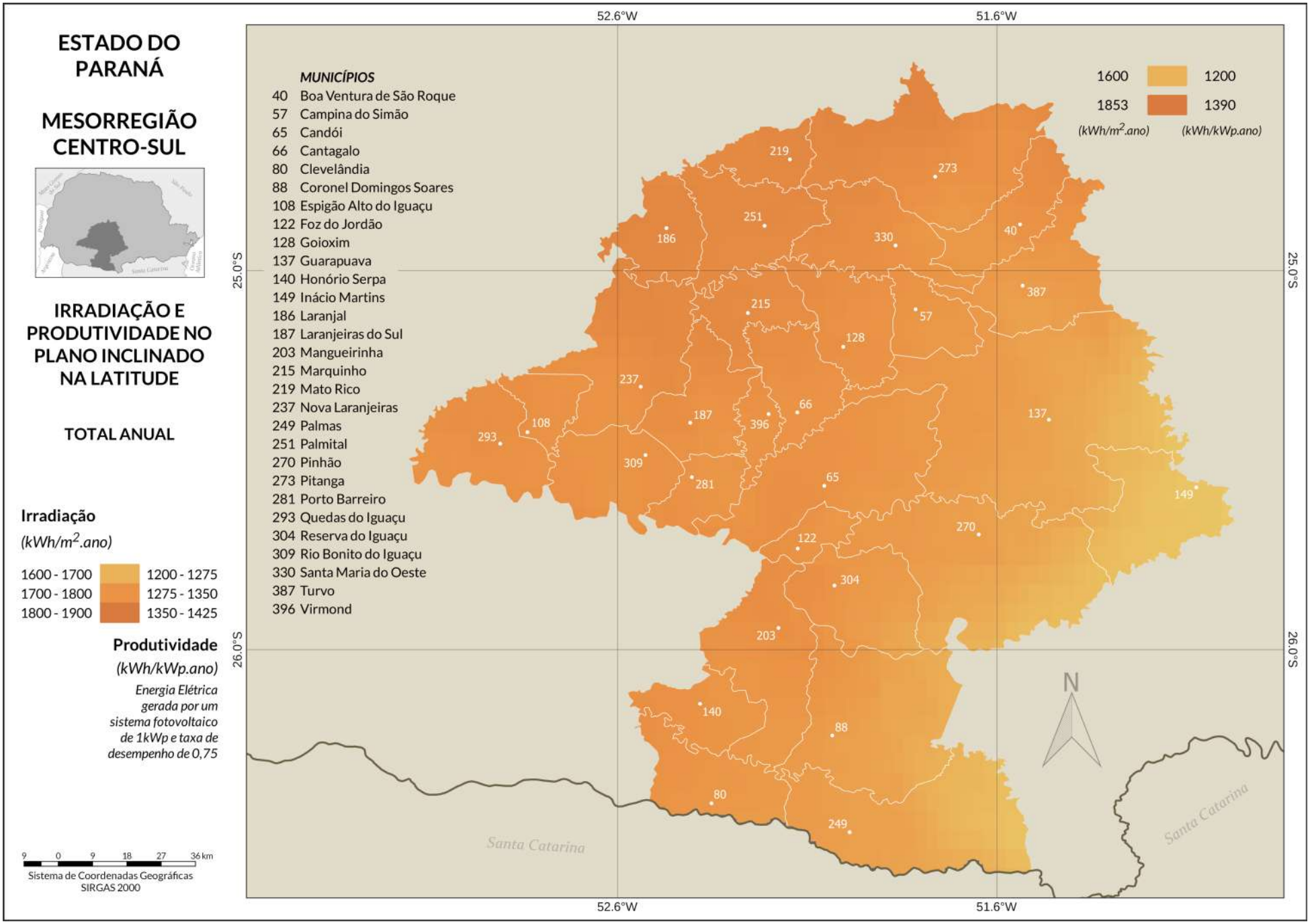

ESTADO DO PARANÁ
IRRADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE NO PLANO INCLINADO NA LATITUDE
MÉDIAS DIÁRIAS MENSAIS
Irradiação
(kWh/m2.dia)
3,01 - 3,29
3,29 - 3,56
3,56 - 3,84
3,84 - 4,11
4,11 - 4,38
4,38 - 4,66
4,66 - 4,93
4,93 - 5,21
5,21 - 5,48
5,48 - 5,75
5,75 - 6,03
2,26 - 2,47
2,47 - 2,67
2,67 - 2,88
2,88 - 3,08
3,08 - 3,29
3,29 - 3,50
3,50 - 3,70
3,70 - 3,90
3,90 - 4,11
4,11 - 4,31
4,31 - 4,52
Produtividade
(kWh/kWp.dia)
Energia Elétrica gerada por um sistema fotovoltaico de 1kWp e taxa de desempenho de 0,75
50 0 50 100 150 200 250 300 km
Sistema de Coordenadas Geográficas SIRGAS 2000
53.5°W
51.5°W
49.5°W
23.5°S
25.5°S
JANEIRO 4,12 3,09 5,82 4,37
FEVEREIRO 4,21 3,16 5,83 4,37
MARÇO 4,03 3,02 5,81 4,36
ABRIL 3,74 2,81 5,57 4,18
MAIO 3,51 2,63 4,75 3,56
JUNHO 3,08 2,31 4,55 3,41
JULHO 3,06 2,30 4,71 3,53
AGOSTO 3,68 2,76 5,56 4,17
SETEMBRO 3,22 2,42 5,22 3,92
OUTUBRO 3,34 2,51 5,42 4,07
NOVEMBRO 3,93 2,95 5,69 4,27
DEZEMBRO 4,10 3,08 5,85 4,39

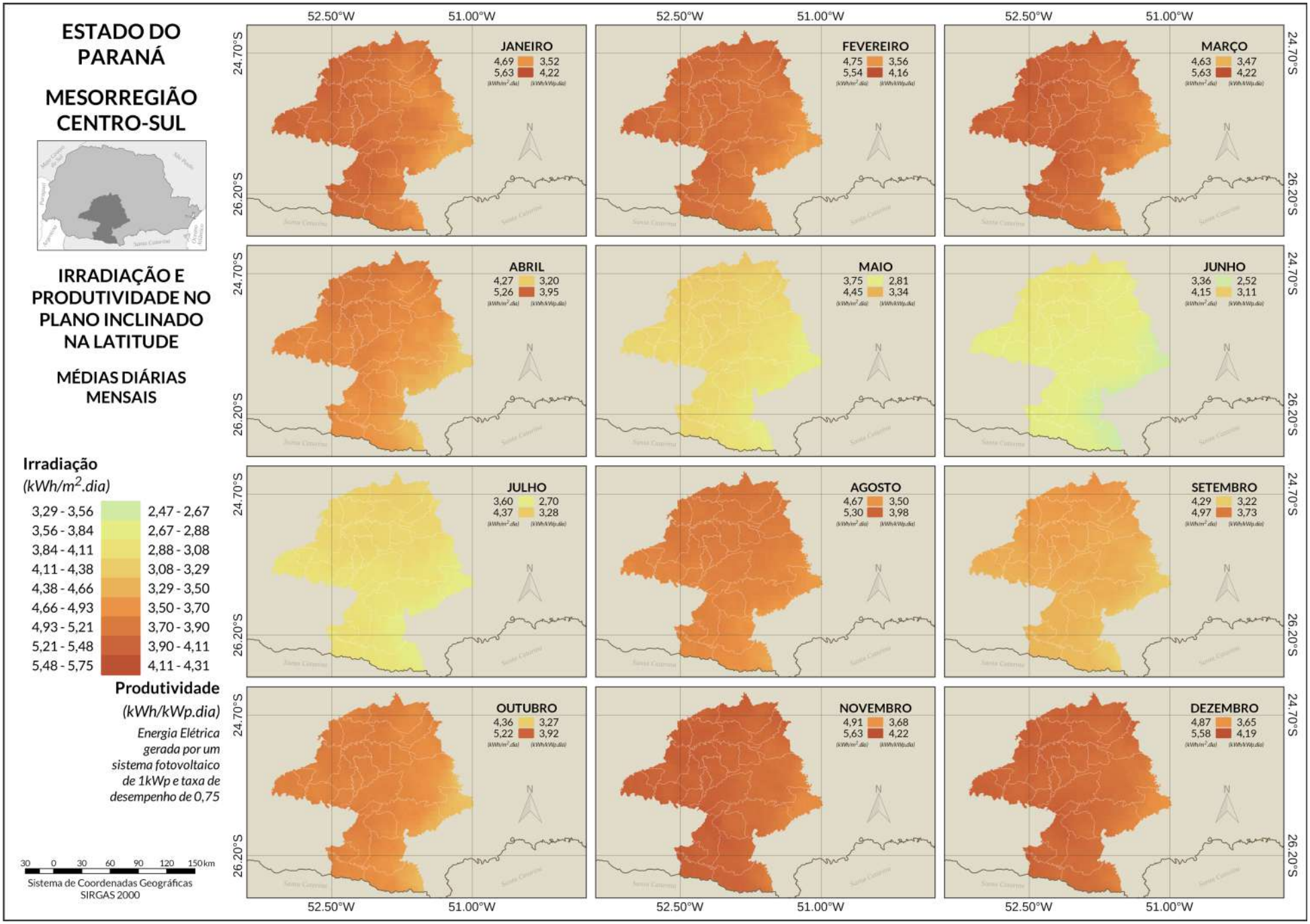

ESTADO DO PARANÁ
MESORREGIÃO CENTRO OCIDENTAL
IRRADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE NO PLANO INCLINADO NA LATITUDE
TOTAL ANUAL
Irradiação
(kWh/m2.ano)
1800 - 1900
1350 - 1425
Produtividade
(kWh/kWp.ano)
Energia Elétrica gerada por um sistema fotovoltaico de 1kWp e taxa de desempenho de 0,75
6 0 6 12 18 24 km
Sistema de Coordenadas Geográficas
SIRGAS 2000
MUNICÍPIOS
6 Altamira do Paraná
23 Araruna
32 Barbosa Ferraz
38 Boa Esperança
56 Campina da Lagoa
63 Campo Mourão
90 Corumbataí do Sul
105 Engenheiro Beltrão
109 Farol
112 Fênix
127 Goioerê
156 Iretama
173 Janiópolis
182 Juranda
194 Luiziana
198 Mamborê
226 Moreira Sales
233 Nova Cantu
262 Peabiru
289 Quarto Centenário
295 Quinta do Sol
299 Rancho Alegre d'Oeste
314 Roncador
376 Terra Boa
388 Ubiratã
1821
1881
(kWh/m2.ano)
1366
1411
(kWh/kWp.ano)
53.1°W
52.1°W
23.7°S
24.7°S
N


ESTADO DO PARANÁ
MESORREGIÃO CENTRO OCIDENTAL
IRRADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE NO PLANO INCLINADO NA LATITUDE
MÉDIAS DIÁRIAS MENSAIS
Irradiação
(kWh/m².dia)
3,84 - 4,11
4,11 - 4,38
4,38 - 4,66
4,66 - 4,93
4,93 - 5,21
5,21 - 5,48
5,48 - 5,75
Produtividade
(kWh/kWp.dia)
2,88 - 3,08
3,08 - 3,29
3,29 - 3,50
3,50 - 3,70
3,70 - 3,90
3,90 - 4,11
4,11 - 4,31
Energia Elétrica gerada por um sistema fotovoltaico de 1kWp e taxa de desempenho de 0,75
20 0 20 40 60 80 100 km
Sistema de Coordenadas Geográficas SIRGAS 2000
53.35°W
51.85°W
53.4°W
51.9°W
23.60°S
24.80°S
23.6°S
24.8°S
JANEIRO
5,35 4,01
5,64 4,23
FEVEREIRO
5,21 3,91
5,58 4,19
MARÇO
5,29 3,97
5,67 4,25
ABRIL
5,06 3,80
5,41 4,06
MAIO
4,33 3,25
4,61 3,46
JUNHO
4,00 3,00
4,31 3,23
JULHO
4,18 3,14
4,46 3,35
AGOSTO
5,10 3,83
5,34 4,01
SETEMBRO
4,79 3,59
5,05 3,79
OUTUBRO
5,01 3,76
5,29 3,97
NOVEMBRO
5,35 4,01
5,62 4,22
DEZEMBRO
5,42 4,07
5,69 4,27
N


ESTADO DO PARANÁ
MESORREGIÃO CENTRO ORIENTAL
IRRADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE NO PLANO INCLINADO NA LATITUDE
TOTAL ANUAL
Irradiação
(kWh/m2.ano)
1500 - 1600
1600 - 1700
1700 - 1800
1800 - 1900
1125 - 1200
1200 - 1275
1275 - 1350
1350 - 1425
Produtividade
(kWh/kWp.ano)
Energia Elétrica gerada por um sistema fotovoltaico de 1kWp e taxa de desempenho de 0,75
8 0 8 16 24 32 km
Sistema de Coordenadas Geográficas
SIRGAS 2000
50.9°W
49.9°W
24.0°S
25.0°S
1575
1181
1867
1400
(kWh/m2.ano)
(kWh/kWp.ano)
São Paulo
MUNICÍPIOS
21 Arapoti
69 Carambeí
72 Castro
147 Imbaú
171 Jaguariaíva
245 Ortigueira
250 Palmeira
271 Piraí do Sul
277 Ponta Grossa
303 Reserva
364 Sengés
375 Telêmaco Borba
379 Tibagi
393 Ventania
N


ESTADO DO PARANÁ
MESORREGIÃO CENTRO ORIENTAL
IRRADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE NO PLANO INCLINADO NA LATITUDE
MÉDIAS DIÁRIAS MENSAIS
Irradiação
(kWh/m2.dia)
3,29 - 3,56
3,56 - 3,84
3,84 - 4,11
4,11 - 4,38
4,38 - 4,66
4,66 - 4,93
4,93 - 5,21
5,21 - 5,48
5,48 - 5,75
2,47 - 2,67
2,67 - 2,88
2,88 - 3,08
3,08 - 3,29
3,29 - 3,50
3,50 - 3,70
3,70 - 3,90
3,90 - 4,11
4,11 - 4,31
Produtividade
(kWh/kWp.dia)
Energia Elétrica gerada por um sistema fotovoltaico de 1kWp e taxa de desempenho de 0,75
30 0 30 60 90 120
Sistema de Coordenadas Geográficas SIRGAS 2000
50.90°W
49.40°W
24.00°S
25.50°S
JANEIRO 4,54 3,41 5,37 4,03
FEVEREIRO 4,80 3,60 5,51 4,13
MARÇO 4,63 3,47 5,61 4,21
ABRIL 4,38 3,29 5,32 3,99
MAIO 3,76 2,82 4,50 3,38
JUNHO 3,31 2,48 4,24 3,18
JULHO 3,41 2,56 4,47 3,35
AGOSTO 4,51 3,38 5,41 4,06
SETEMBRO 4,13 3,10 5,01 3,76
OUTUBRO 4,22 3,17 5,19 3,89
NOVEMBRO 4,72 3,54 5,58 4,19
DEZEMBRO 4,82 3,62 5,58 4,19


ESTADO DO PARANÁ
MESORREGIÃO CENTRO-SUL
IRRADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE NO PLANO INCLINADO NA LATITUDE
TOTAL ANUAL
Irradiação
(kWh/m2.ano)
1600 - 1700
1700 - 1800
1800 - 1900
1200 - 1275
1275 - 1350
1350 - 1425
Produtividade
(kWh/kWp.ano)
Energia Elétrica gerada por um sistema fotovoltaico de 1kWp e taxa de desempenho de 0,75
9 0 9 18 27 36 km
Sistema de Coordenadas Geográficas
SIRGAS 2000
MUNICÍPIOS
40 Boa Ventura de São Roque
57 Campina do Simão
65 Candói
66 Cantagalo
80 Clevelândia
88 Coronel Domingos Soares
108 Espigão Alto do Iguaçu
122 Foz do Jordão
128 Goioxim
137 Guarapuava
140 Honório Serpa
149 Inácio Martins
186 Laranjal
187 Laranjeiras do Sul
203 Mangueirinha
215 Marquinho
219 Mato Rico
237 Nova Laranjeiras
249 Palmas
251 Palmital
270 Pinhão
273 Pitanga
281 Porto Barreiro
293 Quedas do Iguaçu
304 Reserva do Iguaçu
309 Rio Bonito do Iguaçu
330 Santa Maria do Oeste
387 Turvo
396 Virmond
1600
1853
(kWh/m2.ano)
1200
1390
(kWh/kWp.ano)
52.6°W
51.6°W
25.0°S
26.0°S
N
Santa Catarina

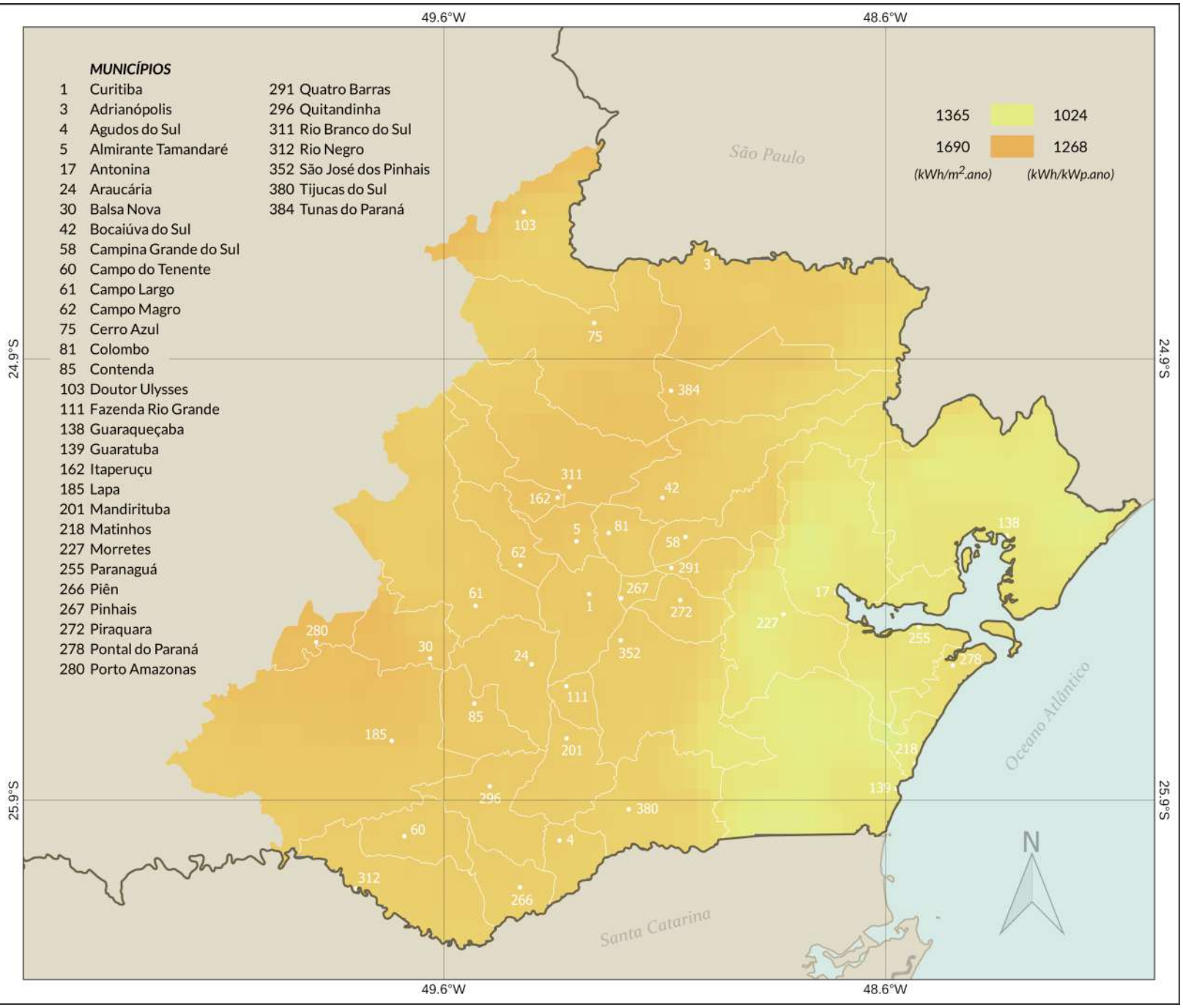

ESTADO DO PARANÁ
MESORREGIÃO CENTRO-SUL
IRRADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE NO PLANO INCLINADO NA LATITUDE
MÉDIAS DIÁRIAS MENSAIS
Irradiação
(kWh/m2.dia)
3,29 - 3,56
3,56 - 3,84
3,84 - 4,11
4,11 - 4,38
4,38 - 4,66
4,66 - 4,93
4,93 - 5,21
5,21 - 5,48
5,48 - 5,75
Produtividade
(kWh/kWp.dia)
2,47 - 2,67
2,67 - 2,88
2,88 - 3,08
3,08 - 3,29
3,29 - 3,50
3,50 - 3,70
3,70 - 3,90
3,90 - 4,11
4,11 - 4,31
Energia Elétrica gerada por um sistema fotovoltaico de 1kWp e taxa de desempenho de 0,75
30 0 30 60 90 120 150 km
Sistema de Coordenadas Geográficas SIRGAS 2000
52.50°W
51.00°W
24.70°S
26.20°S
JANEIRO 4,69 3,52 5,63 4,22
FEVEREIRO 4,75 3,56 5,54 4,16
MARÇO 4,63 3,47 5,63 4,22
ABRIL 4,27 3,20 5,26 3,95
MAIO 3,75 2,81 4,45 3,34
JUNHO 3,36 2,52 4,15 3,11
JULHO 3,60 2,70 4,37 3,28
AGOSTO 4,67 3,50 5,30 3,98
SETEMBRO 4,29 3,22 4,97 3,73
OUTUBRO 4,36 3,27 5,22 3,92
NOVEMBRO 4,91 3,68 5,63 4,22
DEZEMBRO 4,87 3,65 5,58 4,19

ESTADO DO PARANÁ

MESORREGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA

IRRADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE NO PLANO INCLINADO NA LATITUDE

TOTAL ANUAL



Irradiação

(kWh/m².ano)

1300 - 1400	975 - 1050
1400 - 1500	1050 - 1125
1500 - 1600	1125 - 1200
1600 - 1700	1200 - 1275

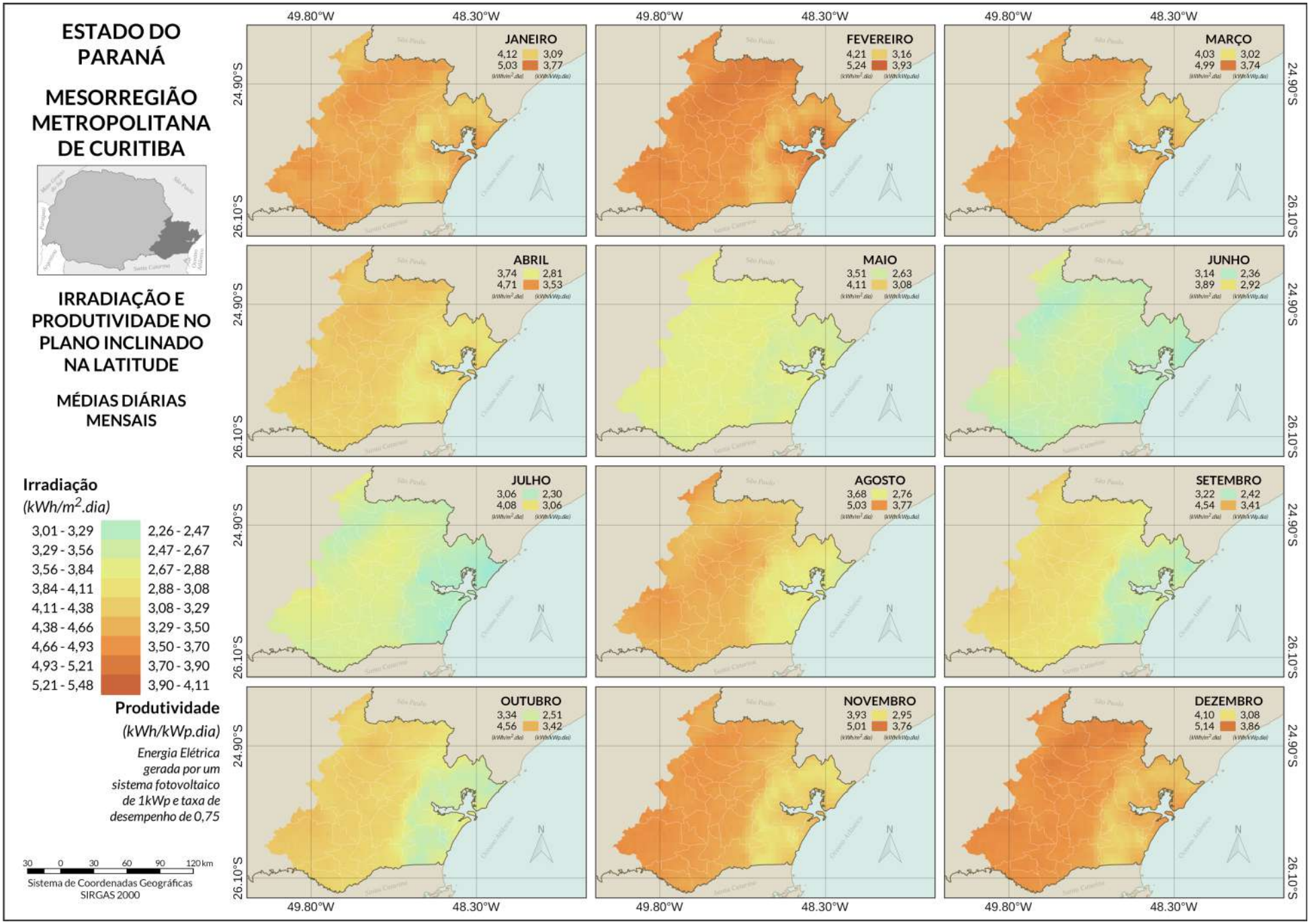
Produtividade

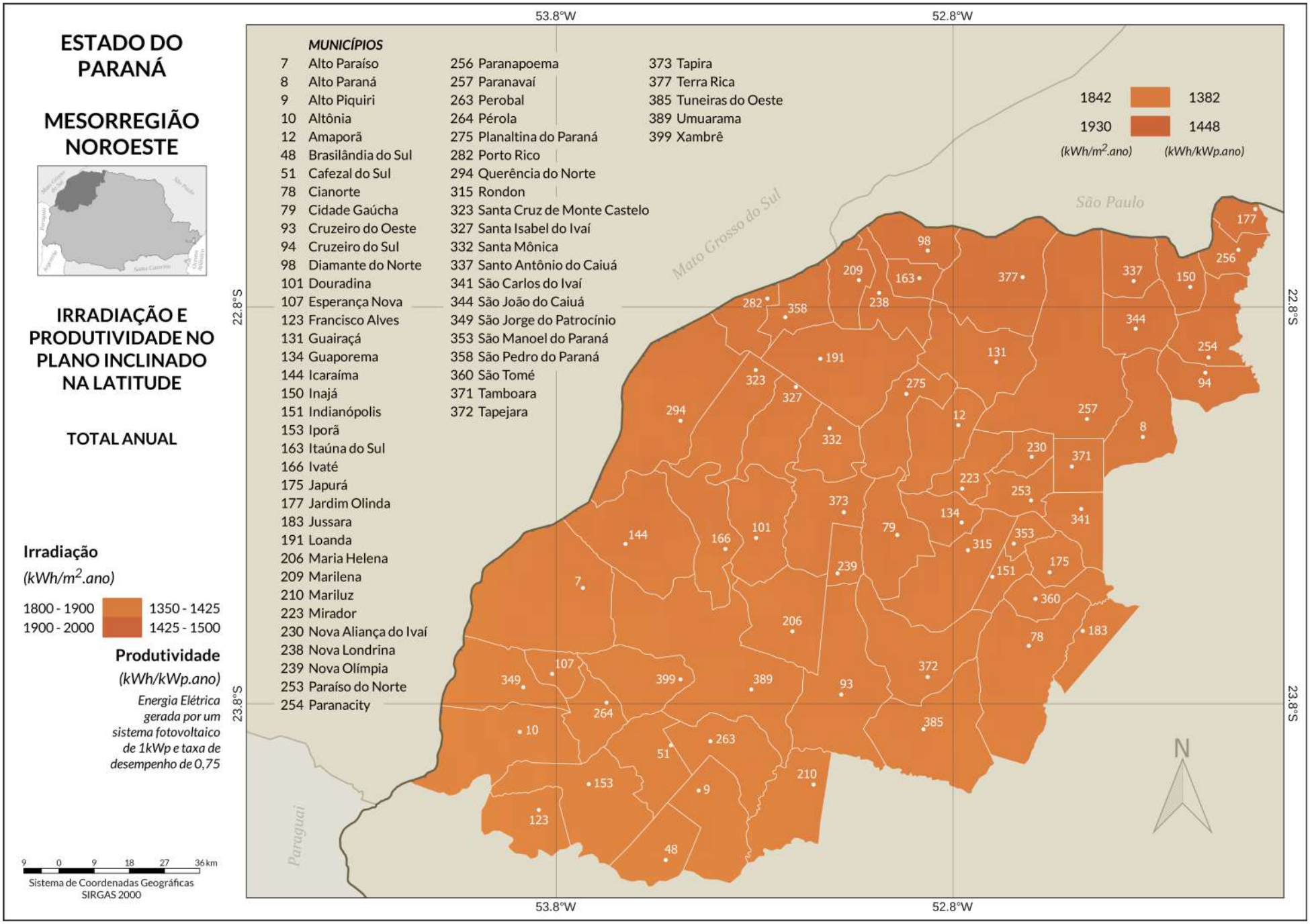
(kWh/kWp.ano)

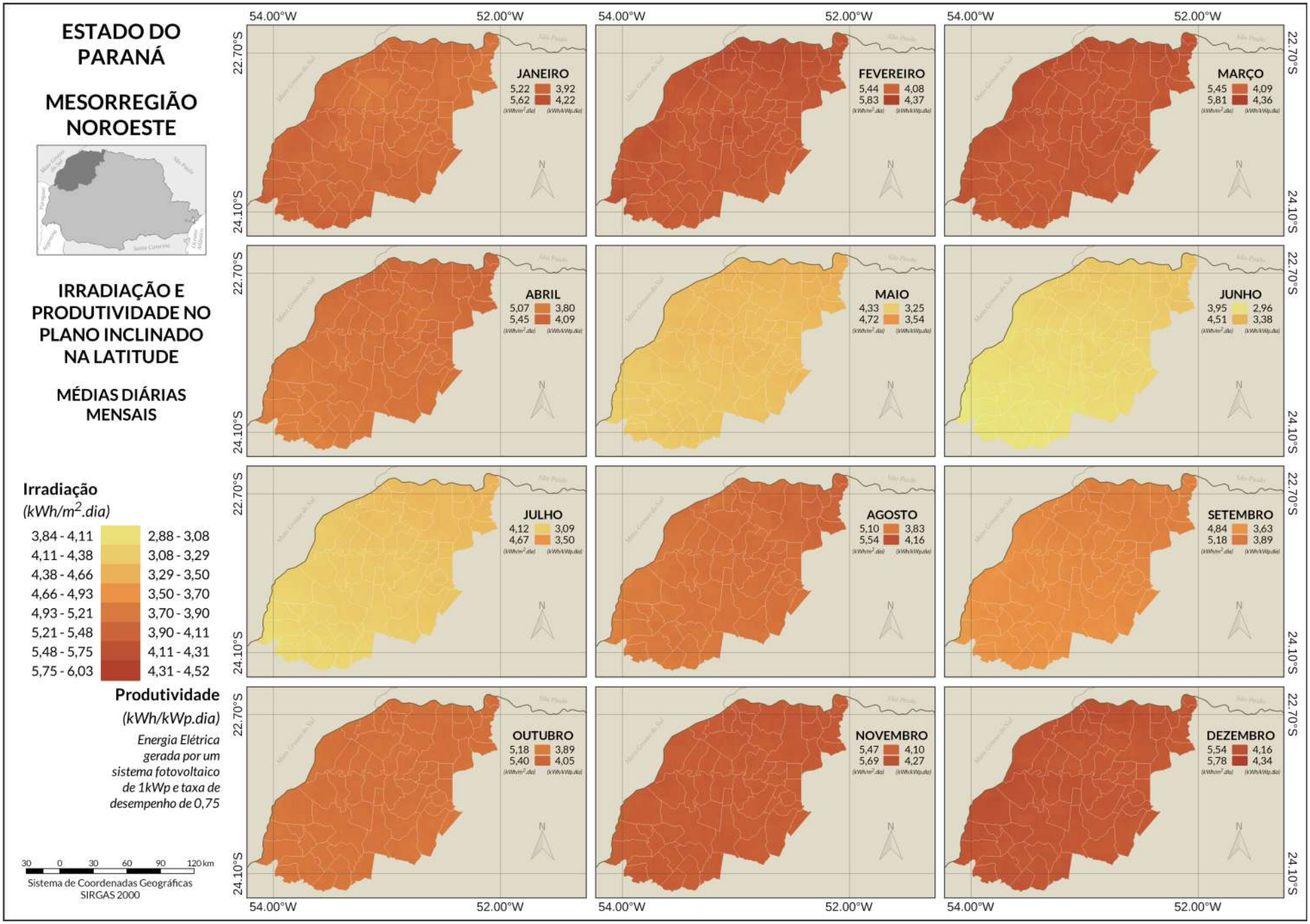
Energia Elétrica gerada por um sistema fotovoltaico de 1kWp e taxa de desempenho de 0,75

8 0 8 16 24 32 km

Sistema de Coordenadas Geográficas SIRGAS 2000


ESTADO DO PARANÁ
MESORREGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA
IRRADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE NO PLANO INCLINADO NA LATITUDE
MÉDIAS DIÁRIAS MENSAIS
Irradiação
(kWh/m2.dia)
3,01 - 3,29
3,29 - 3,56
3,56 - 3,84
3,84 - 4,11
4,11 - 4,38
4,38 - 4,66
4,66 - 4,93
4,93 - 5,21
5,21 - 5,48
2,26 - 2,47
2,47 - 2,67
2,67 - 2,88
2,88 - 3,08
3,08 - 3,29
3,29 - 3,50
3,50 - 3,70
3,70 - 3,90
3,90 - 4,11
Produtividade
(kWh/kWp.dia)
Energia Elétrica gerada por um sistema fotovoltaico de 1kWp e taxa de desempenho de 0,75
30 0 30 60 90 120 km
Sistema de Coordenadas Geográficas SIRGAS 2000
49.80°W
48.30°W
24.90°S
26.10°S
JANEIRO 4,12 3,09 5,03 3,77
FEVEREIRO 4,21 3,16 5,24 3,93
MARÇO 4,03 3,02 4,99 3,74
ABRIL 3,74 2,81 4,71 3,53
MAIO 3,51 2,63 4,11 3,08
JUNHO 3,14 2,36 3,89 2,92
JULHO 3,06 2,30 4,08 3,06
AGOSTO 3,68 2,76 5,03 3,77
SETEMBRO 3,22 2,42 4,54 3,41
OUTUBRO 3,34 2,51 4,56 3,42
NOVEMBRO 3,93 2,95 5,01 3,76
DEZEMBRO 4,10 3,08 5,14 3,86


ESTADO DO PARANÁ
MESORREGIÃO NOROESTE
IRRADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE NO PLANO INCLINADO NA LATITUDE
TOTAL ANUAL
Irradiação
(kWh/m2.ano)
1800 - 1900
1900 - 2000
1350 - 1425
1425 - 1500
Produtividade
(kWh/kWp.ano)
Energia Elétrica gerada por um sistema fotovoltaico de 1kWp e taxa de desempenho de 0,75
9 0 9 18 27 36 km
Sistema de Coordenadas Geográficas
SIRGAS 2000
MUNICÍPIOS
7 Alto Paraíso
8 Alto Paraná
9 Alto Piquiri
10 Altônia
12 Amaporã
48 Brasilândia do Sul
51 Cafezal do Sul
78 Cianorte
79 Cidade Gaúcha
93 Cruzeiro do Oeste
94 Cruzeiro do Sul
98 Diamante do Norte
101 Douradina
107 Esperança Nova
123 Francisco Alves
131 Guairaçá
134 Guaporema
144 Icaraíma
150 Inajá
151 Indianópolis
153 Iporã
163 Itaúna do Sul
166 Ivaté
175 Japurá
177 Jardim Olinda
183 Jussara
191 Loanda
206 Maria Helena
209 Marilena
210 Mariluz
223 Mirador
230 Nova Aliança do Ivaí
238 Nova Londrina
239 Nova Olímpia
253 Paraíso do Norte
254 Paranacity
256 Paranapoema
257 Paranavaí
263 Perobal
264 Pérola
275 Planaltina do Paraná
282 Porto Rico
294 Querência do Norte
315 Rondon
323 Santa Cruz de Monte Castelo
327 Santa Isabel do Ivaí
332 Santa Mônica
337 Santo Antônio do Caiuá
341 São Carlos do Ivaí
344 São João do Caiuá
349 São Jorge do Patrocínio
353 São Manoel do Paraná
358 São Pedro do Paraná
360 São Tomé
371 Tamboara
372 Tapejara
373 Tapira
377 Terra Rica
385 Tuneiras do Oeste
389 Umuarama
399 Xambrê
1842
1930
(kWh/m2.ano)
1382
1448
(kWh/kWp.ano)
53.8°W
52.8°W
22.8°S
23.8°S
Mato Grosso do Sul
São Paulo
Paraguai
N


ESTADO DO PARANÁ
MESORREGIÃO NOROESTE
IRRADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE NO PLANO INCLINADO NA LATITUDE
MÉDIAS DIÁRIAS MENSAIS
Irradiação
(kWh/m².dia)
3,84 - 4,11
4,11 - 4,38
4,38 - 4,66
4,66 - 4,93
4,93 - 5,21
5,21 - 5,48
5,48 - 5,75
5,75 - 6,03
Produtividade
(kWh/kWp.dia)
2,88 - 3,08
3,08 - 3,29
3,29 - 3,50
3,50 - 3,70
3,70 - 3,90
3,90 - 4,11
4,11 - 4,31
4,31 - 4,52
Energia Elétrica gerada por um sistema fotovoltaico de 1kWp e taxa de desempenho de 0,75
30 0 30 60 90 120 km
Sistema de Coordenadas Geográficas SIRGAS 2000
54.00°W
52.00°W
22.70°S
24.10°S
JANEIRO 5,22 3,92 5,62 4,22
FEVEREIRO 5,44 4,08 5,83 4,37
MARÇO 5,45 4,09 5,81 4,36
ABRIL 5,07 3,80 5,45 4,09
MAIO 4,33 3,25 4,72 3,54
JUNHO 3,95 2,96 4,51 3,38
JULHO 4,12 3,09 4,67 3,50
AGOSTO 5,10 3,83 5,54 4,16
SETEMBRO 4,84 3,63 5,18 3,89
OUTUBRO 5,18 3,89 5,40 4,05
NOVEMBRO 5,47 4,10 5,69 4,27
DEZEMBRO 5,54 4,16 5,78 4,34

ESTADO DO PARANÁ

MESORREGIÃO NORTE CENTRAL

IRRADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE NO PLANO INCLINADO NA LATITUDE

TOTAL ANUAL

Irradiação

(kWh/m².ano)

1700 - 1800	1275 - 1350
1800 - 1900	1350 - 1425
1900 - 2000	1425 - 1500

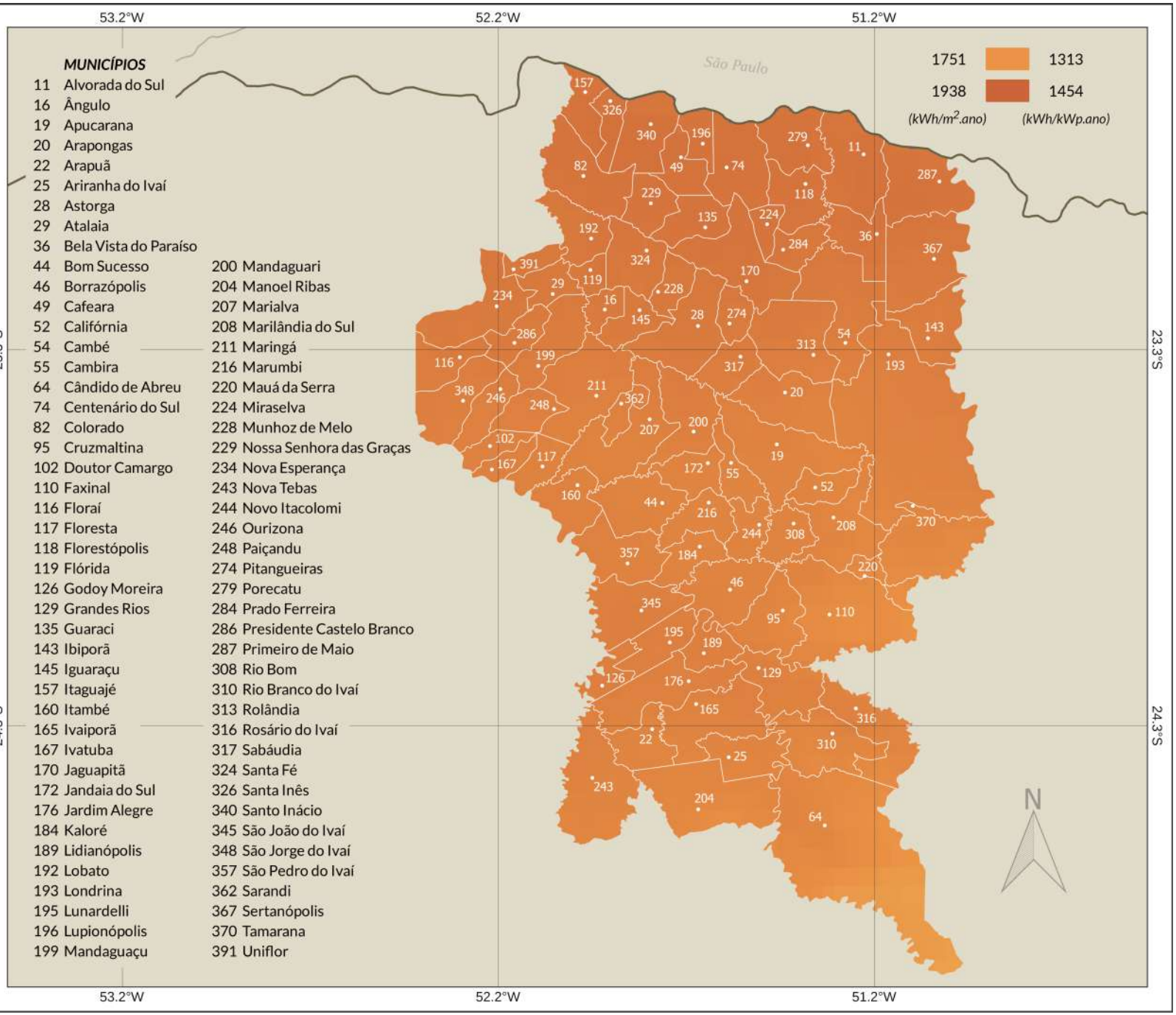
Produtividade

(kWh/kWp.ano)

Energia Elétrica gerada por um sistema fotovoltaico de 1kWp e taxa de desempenho de 0,75

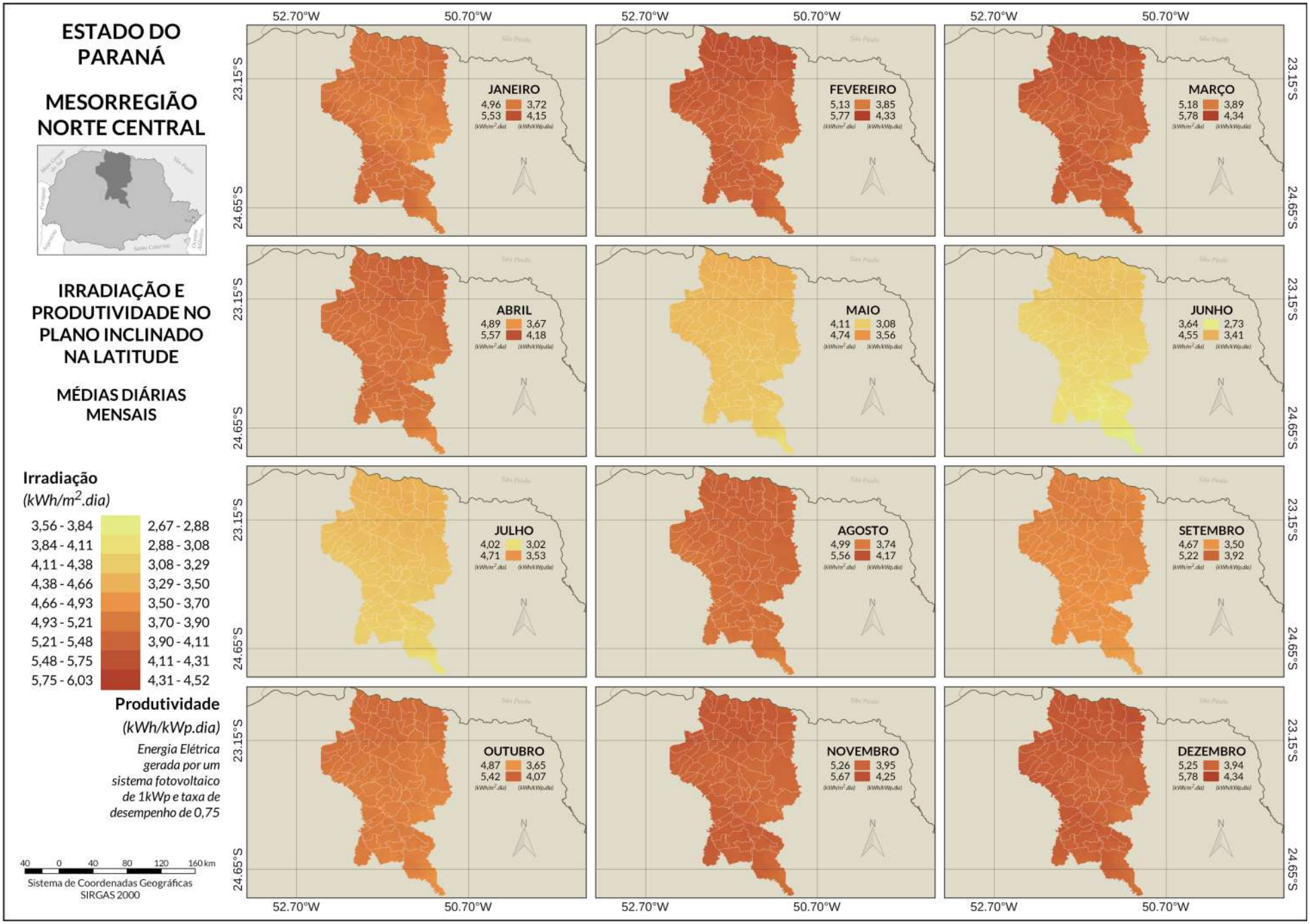
10 0 10 20 30 40 km

Sistema de Coordenadas Geográficas SIRGAS 2000



MUNICÍPIOS

11 Alvorada do Sul
16 Ângulo
19 Apucarana
20 Arapongas
22 Arapuã
25 Ariranha do Ivaí
28 Astorga
29 Atalaia
36 Bela Vista do Paraíso
44 Bom Sucesso
46 Borrazópolis
49 Cafeara
52 Califórnia
54 Cambé
55 Cambira
64 Cândido de Abreu
74 Centenário do Sul
82 Colorado
95 Cruzmaltina
102 Doutor Camargo
110 Faxinal
116 Floraí
117 Floresta
118 Florestópolis
119 Flórida
126 Godoy Moreira
129 Grandes Rios
135 Guaraci
143 Ibiporã
145 Iguaraçu
157 Itaguajé
160 Itambé
165 Ivaiporã
167 Ivatuba
170 Jaguapitã
172 Jandaia do Sul
176 Jardim Alegre
184 Kaloré
189 Lidianópolis
192 Lobato
193 Londrina
195 Lunardelli
196 Lupionópolis
199 Mandaguaçu
200 Mandaguari
204 Manoel Ribas
207 Marialva
208 Marilândia do Sul
211 Maringá
216 Marumbi
220 Mauá da Serra
224 Miraselva
228 Munhoz de Melo
229 Nossa Senhora das Graças
234 Nova Esperança
243 Nova Tebas
244 Novo Itacolomi
246 Ourizona
248 Paiçandu
274 Pitangueiras
279 Porecatu
284 Prado Ferreira
286 Presidente Castelo Branco
287 Primeiro de Maio
308 Rio Bom
310 Rio Branco do Ivaí
313 Rolândia
316 Rosário do Ivaí
317 Sabáudia
324 Santa Fé
326 Santa Inês
340 Santo Inácio
345 São João do Ivaí
348 São Jorge do Ivaí
357 São Pedro do Ivaí
362 Sarandi
367 Sertanópolis
370 Tamarana
391 Uniflor


ESTADO DO PARANÁ
MESORREGIÃO NORTE CENTRAL
IRRADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE NO PLANO INCLINADO NA LATITUDE
MÉDIAS DIÁRIAS MENSAIS
Irradiação (kWh/m2.dia)
3,56 - 3,84 2,67 - 2,88
3,84 - 4,11 2,88 - 3,08
4,11 - 4,38 3,08 - 3,29
4,38 - 4,66 3,29 - 3,50
4,66 - 4,93 3,50 - 3,70
4,93 - 5,21 3,70 - 3,90
5,21 - 5,48 3,90 - 4,11
5,48 - 5,75 4,11 - 4,31
5,75 - 6,03 4,31 - 4,52
Produtividade (kWh/kWp.dia)
Energia Elétrica gerada por um sistema fotovoltaico de 1kWp e taxa de desempenho de 0,75
40 0 40 80 120 160 km
Sistema de Coordenadas Geográficas SIRGAS 2000
52.70°W
50.70°W
23.15°S
24.65°S
JANEIRO 4,96 3,72 5,53 4,15
FEVEREIRO 5,13 3,85 5,77 4,33
MARÇO 5,18 3,89 5,78 4,34
ABRIL 4,89 3,67 5,57 4,18
MAIO 4,11 3,08 4,74 3,56
JUNHO 3,64 2,73 4,55 3,41
JULHO 4,02 3,02 4,71 3,53
AGOSTO 4,99 3,74 5,56 4,17
SETEMBRO 4,67 3,50 5,22 3,92
OUTUBRO 4,87 3,65 5,42 4,07
NOVEMBRO 5,26 3,95 5,67 4,25
DEZEMBRO 5,25 3,94 5,78 4,34

ESTADO DO PARANÁ

MESORREGIÃO NORTE PIONEIRO

IRRADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE NO PLANO INCLINADO NA LATITUDE

TOTAL ANUAL

Irradiação

(kWh/m².ano)

1700 - 1800	1275 - 1350
1800 - 1900	1350 - 1425
1900 - 2000	1425 - 1500

Produtividade

(kWh/kWp.ano)

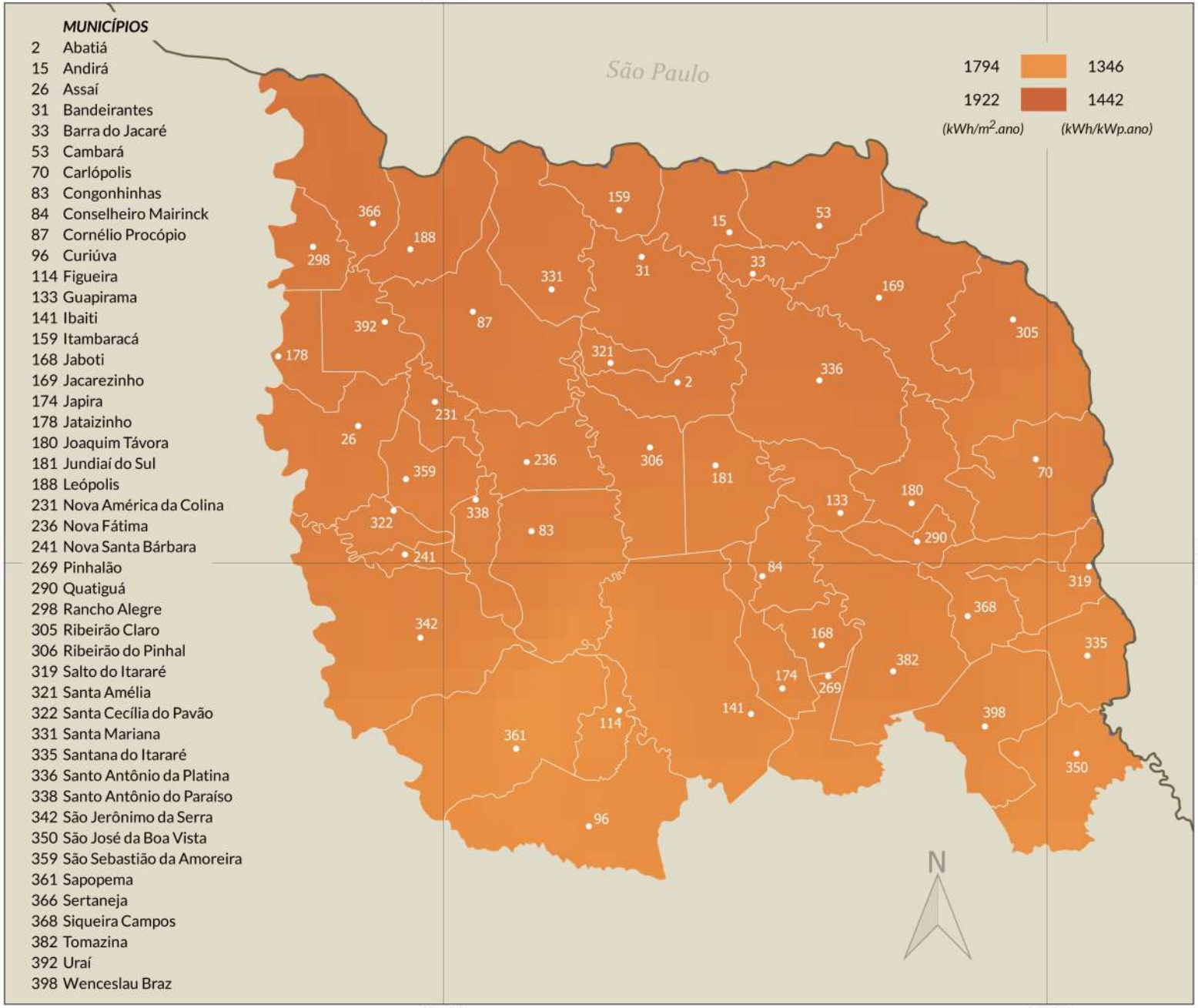
Energia Elétrica gerada por um sistema fotovoltaico de 1kWp e taxa de desempenho de 0,75

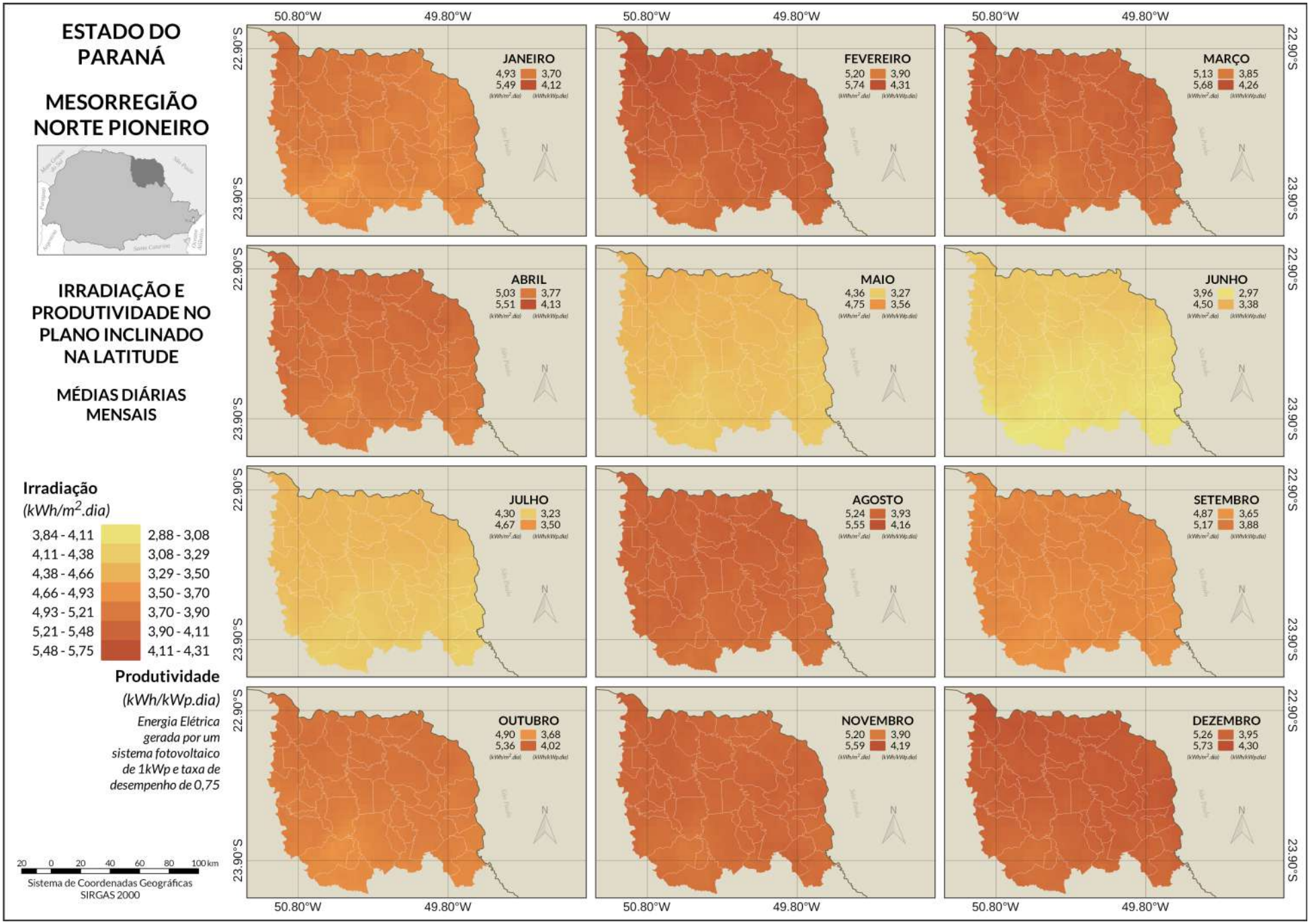
7 0 7 14 21 28 km

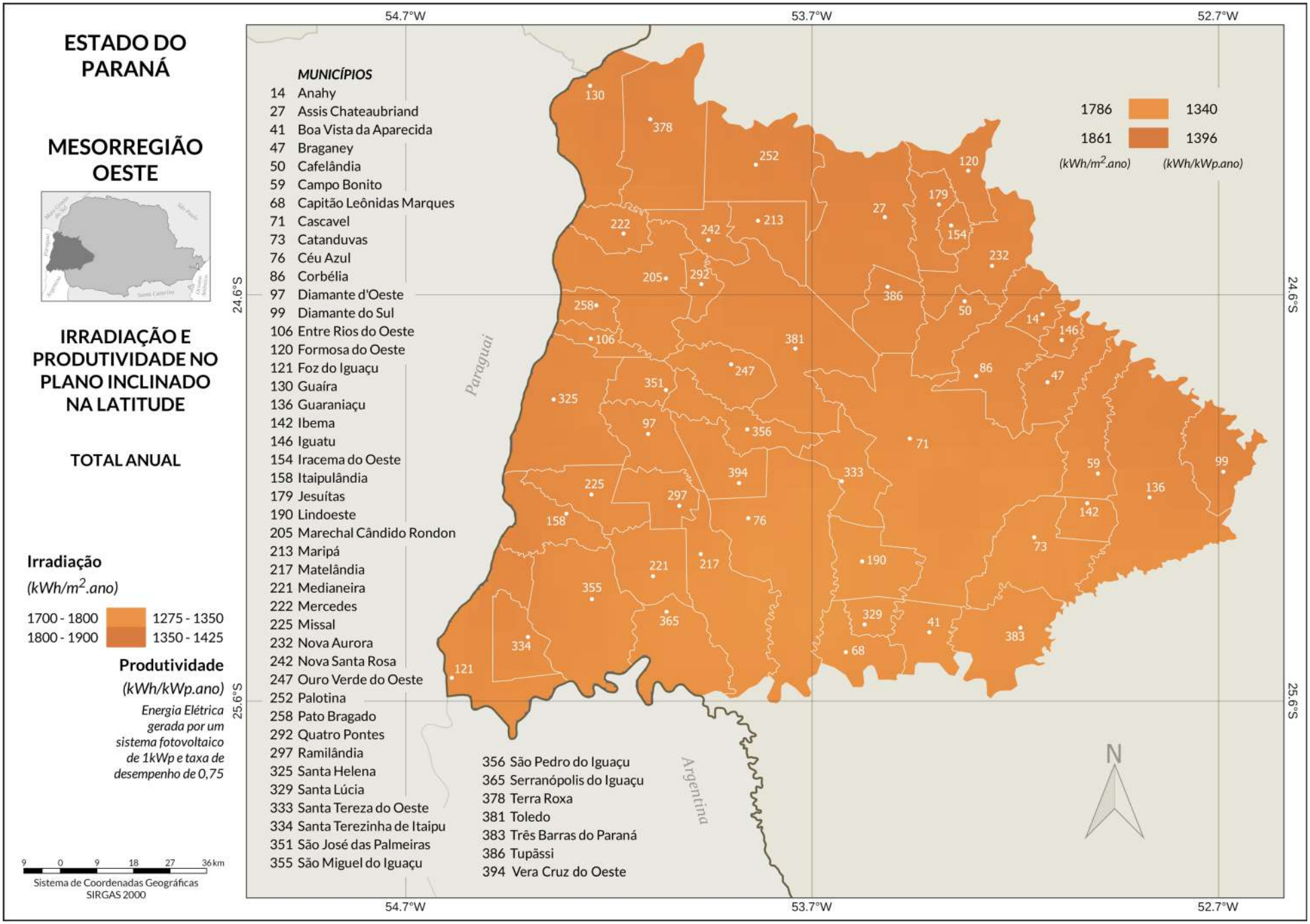
Sistema de Coordenadas Geográficas SIRGAS 2000

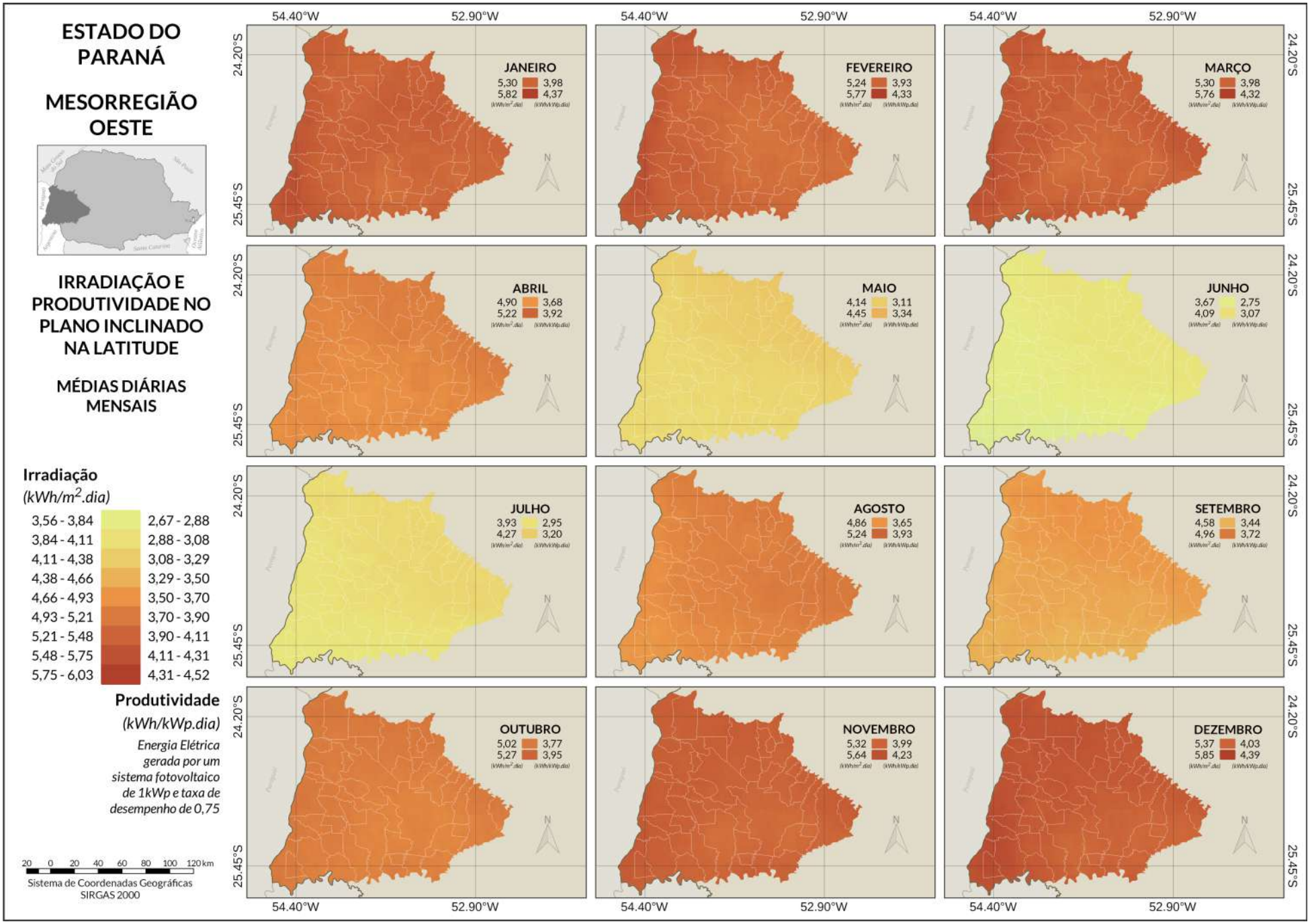
MUNICÍPIOS

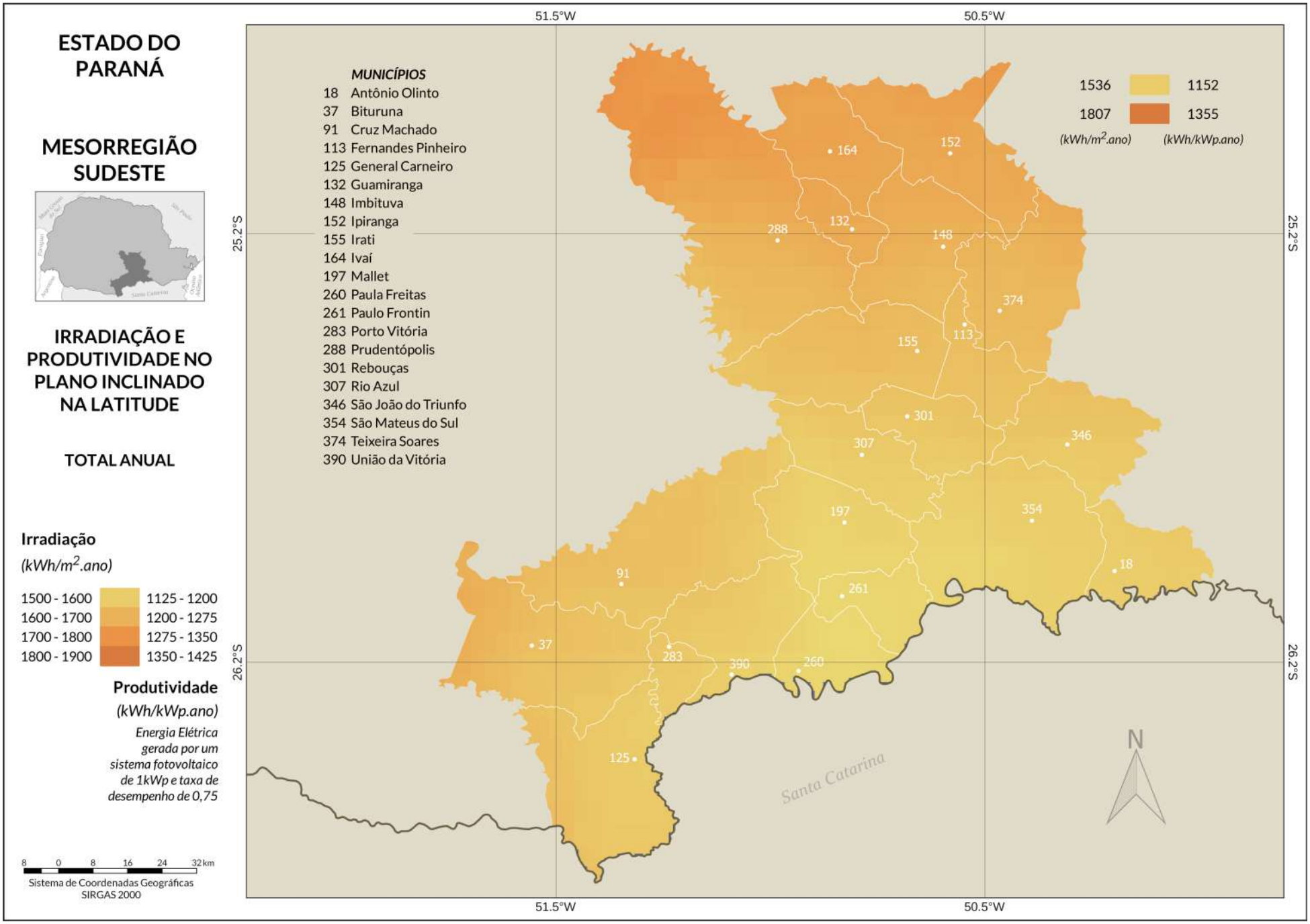
2 Abatiá
15 Andirá
26 Assaí
31 Bandeirantes
33 Barra do Jacaré
53 Cambará
70 Carlópolis
83 Congonhinhas
84 Conselheiro Mairinck
87 Cornélio Procópio
96 Curiúva
114 Figueira
133 Guapirama
141 Ibaiti
159 Itambaracá
168 Jaboti
169 Jacarezinho
174 Japira
178 Jataizinho
180 Joaquim Távora
181 Jundiaí do Sul
188 Leópolis
231 Nova América da Colina
236 Nova Fátima
241 Nova Santa Bárbara
269 Pinhalão
290 Quatiguá
298 Rancho Alegre
305 Ribeirão Claro
306 Ribeirão do Pinhal
319 Salto do Itararé
321 Santa Amélia
322 Santa Cecília do Pavão
331 Santa Mariana
335 Santana do Itararé
336 Santo Antônio da Platina
338 Santo Antônio do Paraíso
342 São Jerônimo da Serra
350 São José da Boa Vista
359 São Sebastião da Amoreira
361 Sapopema
366 Sertaneja
368 Siqueira Campos
382 Tomazina
392 Uraí
398 Wenceslau Braz

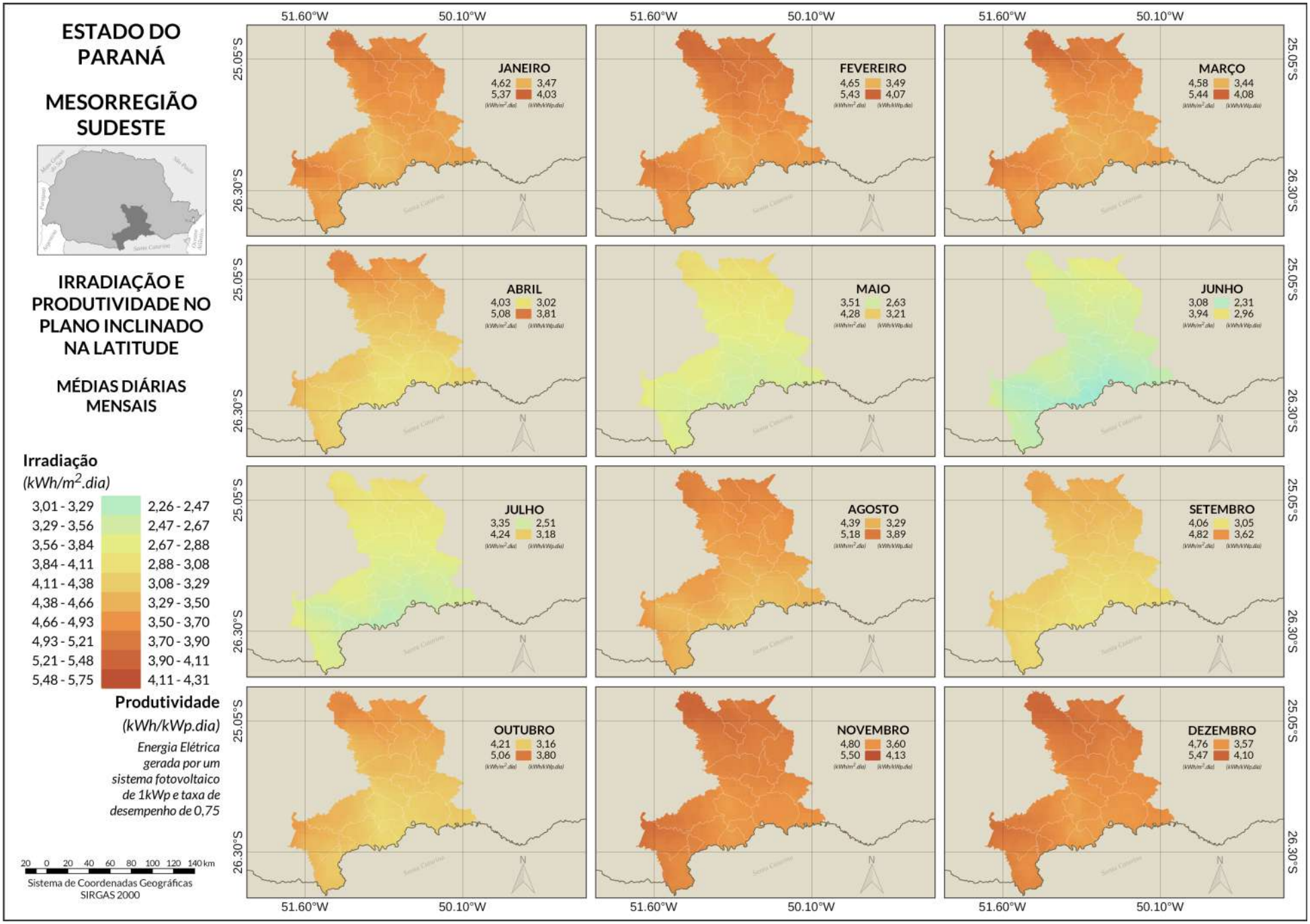


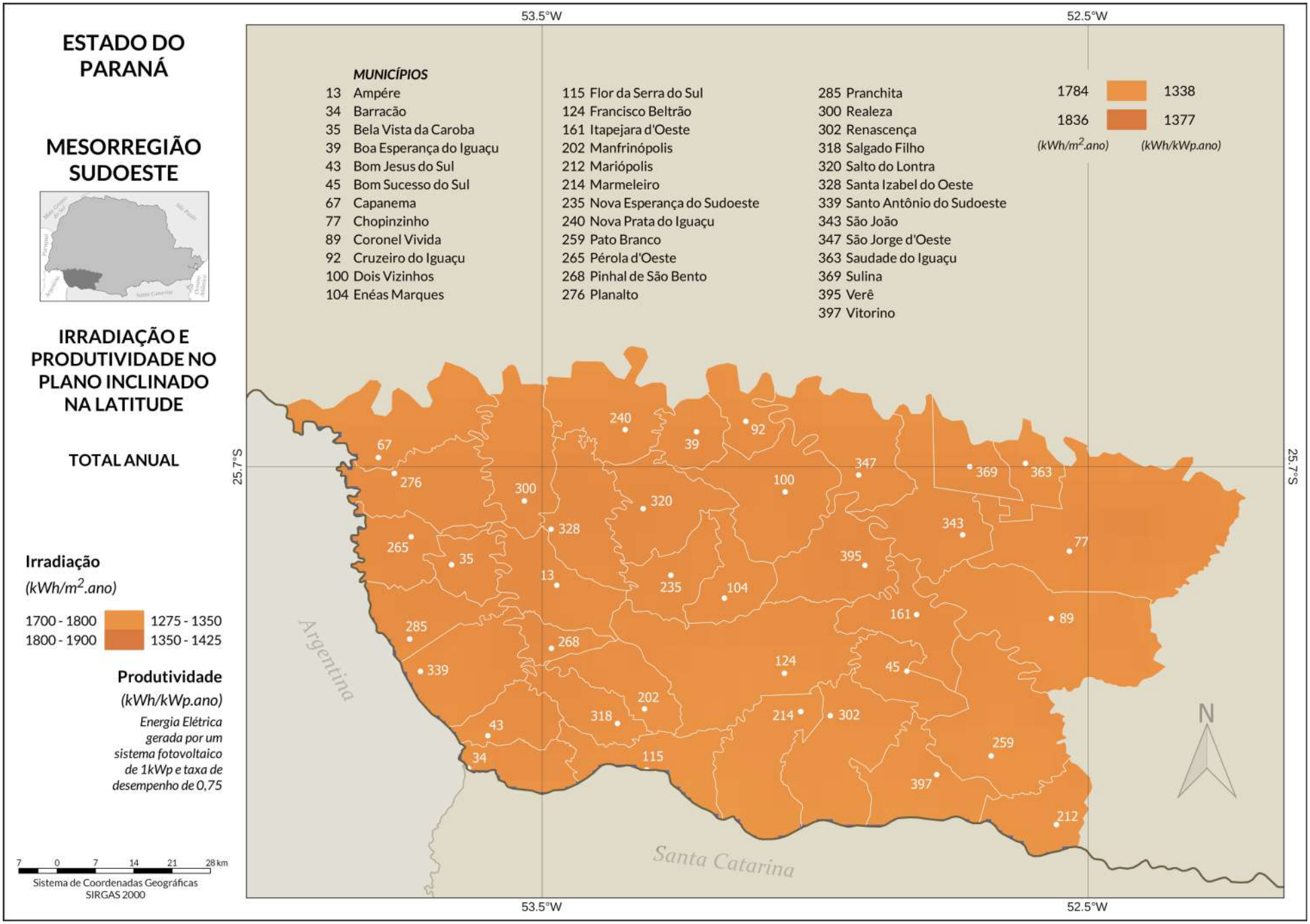

ESTADO DO PARANÁ
MESORREGIÃO NORTE PIONEIRO
IRRADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE NO PLANO INCLINADO NA LATITUDE
MÉDIAS DIÁRIAS MENSAIS
Irradiação
(kWh/m2.dia)
3,84 - 4,11
4,11 - 4,38
4,38 - 4,66
4,66 - 4,93
4,93 - 5,21
5,21 - 5,48
5,48 - 5,75
2,88 - 3,08
3,08 - 3,29
3,29 - 3,50
3,50 - 3,70
3,70 - 3,90
3,90 - 4,11
4,11 - 4,31
Produtividade
(kWh/kWp.dia)
Energia Elétrica gerada por um sistema fotovoltaico de 1kWp e taxa de desempenho de 0,75
20 0 20 40 60 80 100 km
Sistema de Coordenadas Geográficas
SIRGAS 2000
50.80°W
49.80°W
22.90°S
23.90°S
JANEIRO
4,93 3,70
5,49 4,12
FEVEREIRO
5,20 3,90
5,74 4,31
MARÇO
5,13 3,85
5,68 4,26
ABRIL
5,03 3,77
5,51 4,13
MAIO
4,36 3,27
4,75 3,56
JUNHO
3,96 2,97
4,50 3,38
JULHO
4,30 3,23
4,67 3,50
AGOSTO
5,24 3,93
5,55 4,16
SETEMBRO
4,87 3,65
5,17 3,88
OUTUBRO
4,90 3,68
5,36 4,02
NOVEMBRO
5,20 3,90
5,59 4,19
DEZEMBRO
5,26 3,95
5,73 4,30

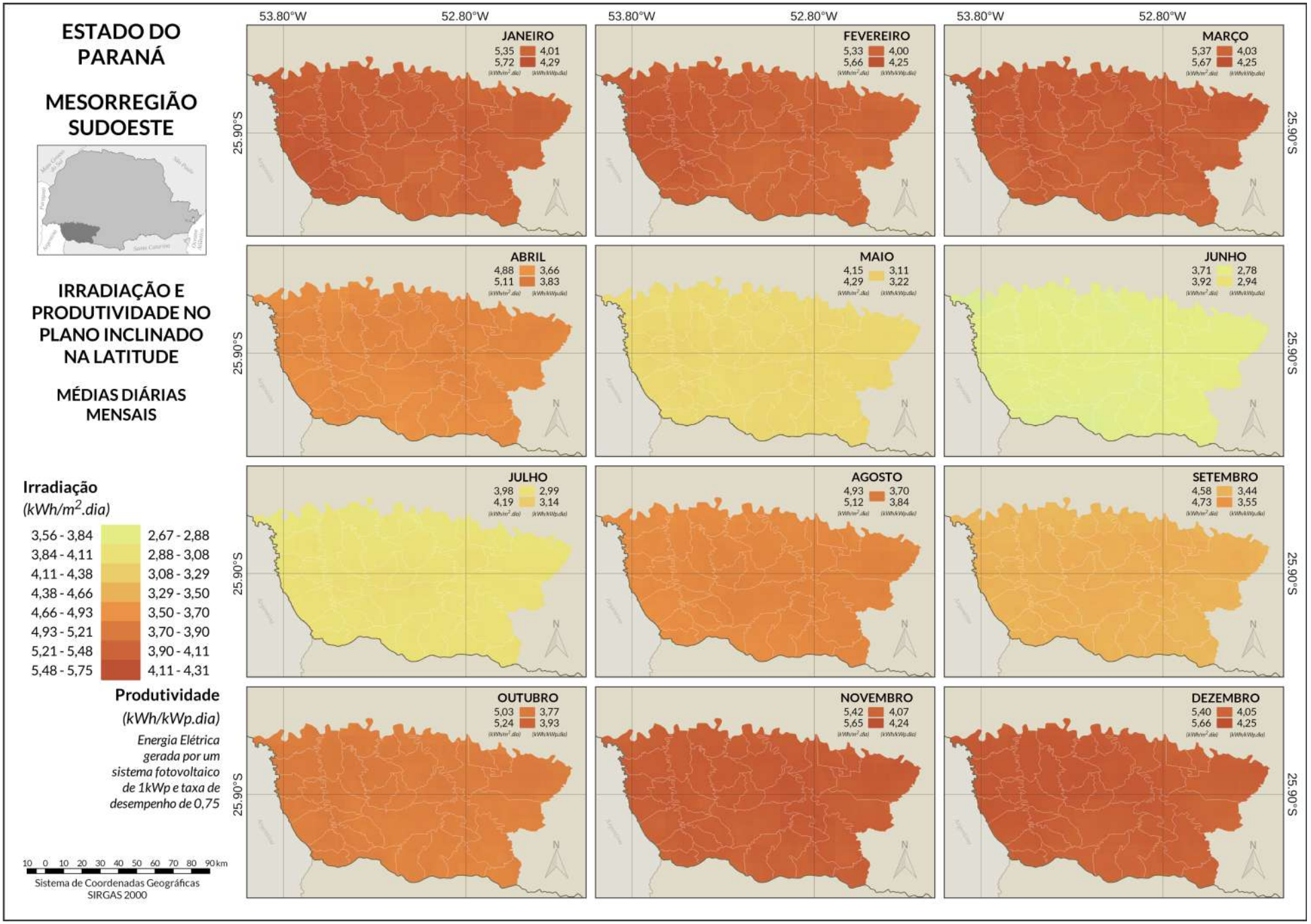

ESTADO DO PARANÁ
MESORREGIÃO OESTE
IRRADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE NO PLANO INCLINADO NA LATITUDE
TOTAL ANUAL
Irradiação
(kWh/m2.ano)
1700 - 1800
1800 - 1900
1275 - 1350
1350 - 1425
Produtividade
(kWh/kWp.ano)
Energia Elétrica gerada por um sistema fotovoltaico de 1kWp e taxa de desempenho de 0,75
9 0 9 18 27 36 km
Sistema de Coordenadas Geográficas
SIRGAS 2000
MUNICÍPIOS
14 Anahy
27 Assis Chateaubriand
41 Boa Vista da Aparecida
47 Braganey
50 Cafelândia
59 Campo Bonito
68 Capitão Leônidas Marques
71 Cascavel
73 Catanduvas
76 Céu Azul
86 Corbélia
97 Diamante d'Oeste
99 Diamante do Sul
106 Entre Rios do Oeste
120 Formosa do Oeste
121 Foz do Iguaçu
130 Guaíra
136 Guaraniaçu
142 Ibema
146 Iguatu
154 Iracema do Oeste
158 Itaipulândia
179 Jesuítas
190 Lindoeste
205 Marechal Cândido Rondon
213 Maripá
217 Matelândia
221 Medianeira
222 Mercedes
225 Missal
232 Nova Aurora
242 Nova Santa Rosa
247 Ouro Verde do Oeste
252 Palotina
258 Pato Bragado
292 Quatro Pontes
297 Ramilândia
325 Santa Helena
329 Santa Lúcia
333 Santa Tereza do Oeste
334 Santa Terezinha de Itaipu
351 São José das Palmeiras
355 São Miguel do Iguaçu
356 São Pedro do Iguaçu
365 Serranópolis do Iguaçu
378 Terra Roxa
381 Toledo
383 Três Barras do Paraná
386 Tupãssi
394 Vera Cruz do Oeste
1786
1861
(kWh/m2.ano)
1340
1396
(kWh/kWp.ano)
Paraguai
Argentina
N
54.7°W
53.7°W
52.7°W
24.6°S
25.6°S


ESTADO DO PARANÁ
MESORREGIÃO OESTE
IRRADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE NO PLANO INCLINADO NA LATITUDE
MÉDIAS DIÁRIAS MENSAIS
Irradiação
(kWh/m2.dia)
3,56 - 3,84
3,84 - 4,11
4,11 - 4,38
4,38 - 4,66
4,66 - 4,93
4,93 - 5,21
5,21 - 5,48
5,48 - 5,75
5,75 - 6,03
2,67 - 2,88
2,88 - 3,08
3,08 - 3,29
3,29 - 3,50
3,50 - 3,70
3,70 - 3,90
3,90 - 4,11
4,11 - 4,31
4,31 - 4,52
Produtividade
(kWh/kWp.dia)
Energia Elétrica gerada por um sistema fotovoltaico de 1kWp e taxa de desempenho de 0,75
20 0 20 40 60 80 100 120 km
Sistema de Coordenadas Geográficas
SIRGAS 2000
54.40°W
52.90°W
24.20°S
25.45°S
JANEIRO
5,30 3,98
5,82 4,37
FEVEREIRO
5,24 3,93
5,77 4,33
MARÇO
5,30 3,98
5,76 4,32
ABRIL
4,90 3,68
5,22 3,92
MAIO
4,14 3,11
4,45 3,34
JUNHO
3,67 2,75
4,09 3,07
JULHO
3,93 2,95
4,27 3,20
AGOSTO
4,86 3,65
5,24 3,93
SETEMBRO
4,58 3,44
4,96 3,72
OUTUBRO
5,02 3,77
5,27 3,95
NOVEMBRO
5,32 3,99
5,64 4,23
DEZEMBRO
5,37 4,03
5,85 4,39


ESTADO DO PARANÁ
MESORREGIÃO SUDESTE
IRRADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE NO PLANO INCLINADO NA LATITUDE
TOTAL ANUAL
Irradiação
(kWh/m2.ano)
1500 - 1600
1600 - 1700
1700 - 1800
1800 - 1900
1125 - 1200
1200 - 1275
1275 - 1350
1350 - 1425
Produtividade
(kWh/kWp.ano)
Energia Elétrica gerada por um sistema fotovoltaico de 1kWp e taxa de desempenho de 0,75
8 0 8 16 24 32 km
Sistema de Coordenadas Geográficas SIRGAS 2000
MUNICÍPIOS
18 Antônio Olinto
37 Bituruna
91 Cruz Machado
113 Fernandes Pinheiro
125 General Carneiro
132 Guamiranga
148 Imbituva
152 Ipiranga
155 Irati
164 Ivaí
197 Mallet
260 Paula Freitas
261 Paulo Frontin
283 Porto Vitória
288 Prudentópolis
301 Rebouças
307 Rio Azul
346 São João do Triunfo
354 São Mateus do Sul
374 Teixeira Soares
390 União da Vitória
1536
1807
(kWh/m2.ano)
1152
1355
(kWh/kWp.ano)
51.5°W
50.5°W
25.2°S
26.2°S
Santa Catarina
N


ESTADO DO PARANÁ
MESORREGIÃO SUDESTE
IRRADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE NO PLANO INCLINADO NA LATITUDE
MÉDIAS DIÁRIAS MENSAIS
Irradiação
(kWh/m2.dia)
3,01 - 3,29
3,29 - 3,56
3,56 - 3,84
3,84 - 4,11
4,11 - 4,38
4,38 - 4,66
4,66 - 4,93
4,93 - 5,21
5,21 - 5,48
5,48 - 5,75
2,26 - 2,47
2,47 - 2,67
2,67 - 2,88
2,88 - 3,08
3,08 - 3,29
3,29 - 3,50
3,50 - 3,70
3,70 - 3,90
3,90 - 4,11
4,11 - 4,31
Produtividade
(kWh/kWp.dia)
Energia Elétrica gerada por um sistema fotovoltaico de 1kWp e taxa de desempenho de 0,75
20 0 20 40 60 80 100 120 140 km
Sistema de Coordenadas Geográficas SIRGAS 2000
51.60°W
50.10°W
25.05°S
26.30°S
JANEIRO 4,62 3,47 5,37 4,03
FEVEREIRO 4,65 3,49 5,43 4,07
MARÇO 4,58 3,44 5,44 4,08
ABRIL 4,03 3,02 5,08 3,81
MAIO 3,51 2,63 4,28 3,21
JUNHO 3,08 2,31 3,94 2,96
JULHO 3,35 2,51 4,24 3,18
AGOSTO 4,39 3,29 5,18 3,89
SETEMBRO 4,06 3,05 4,82 3,62
OUTUBRO 4,21 3,16 5,06 3,80
NOVEMBRO 4,80 3,60 5,50 4,13
DEZEMBRO 4,76 3,57 5,47 4,10


ESTADO DO PARANÁ
MESORREGIÃO SUDOESTE
IRRADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE NO PLANO INCLINADO NA LATITUDE
TOTAL ANUAL
Irradiação
(kWh/m2.ano)
1700 - 1800
1800 - 1900
1275 - 1350
1350 - 1425
Produtividade
(kWh/kWp.ano)
Energia Elétrica gerada por um sistema fotovoltaico de 1kWp e taxa de desempenho de 0,75
7 0 7 14 21 28 km
Sistema de Coordenadas Geográficas SIRGAS 2000
53.5°W
52.5°W
25.7°S
MUNICÍPIOS
13 Ampére
34 Barracão
35 Bela Vista da Caroba
39 Boa Esperança do Iguaçu
43 Bom Jesus do Sul
45 Bom Sucesso do Sul
67 Capanema
77 Chopinzinho
89 Coronel Vivida
92 Cruzeiro do Iguaçu
100 Dois Vizinhos
104 Enéas Marques
115 Flor da Serra do Sul
124 Francisco Beltrão
161 Itapejara d'Oeste
202 Manfrinópolis
212 Mariópolis
214 Marmeleiro
235 Nova Esperança do Sudoeste
240 Nova Prata do Iguaçu
259 Pato Branco
265 Pérola d'Oeste
268 Pinhal de São Bento
276 Planalto
285 Pranchita
300 Realeza
302 Renascença
318 Salgado Filho
320 Salto do Lontra
328 Santa Izabel do Oeste
339 Santo Antônio do Sudoeste
343 São João
347 São Jorge d'Oeste
363 Saudade do Iguaçu
369 Sulina
395 Verê
397 Vitorino
1784
1836
(kWh/m2.ano)
1338
1377
(kWh/kWp.ano)
Argentina
Santa Catarina
N


ESTADO DO PARANÁ
MESORREGIÃO SUDOESTE
IRRADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE NO PLANO INCLINADO NA LATITUDE
MÉDIAS DIÁRIAS MENSAIS
Irradiação
(kWh/m2.dia)
3,56 - 3,84
3,84 - 4,11
4,11 - 4,38
4,38 - 4,66
4,66 - 4,93
4,93 - 5,21
5,21 - 5,48
5,48 - 5,75
2,67 - 2,88
2,88 - 3,08
3,08 - 3,29
3,29 - 3,50
3,50 - 3,70
3,70 - 3,90
3,90 - 4,11
4,11 - 4,31
Produtividade
(kWh/kWp.dia)
Energia Elétrica gerada por um sistema fotovoltaico de 1kWp e taxa de desempenho de 0,75
10 0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 km
Sistema de Coordenadas Geográficas
SIRGAS 2000
53.80°W
52.80°W
25.90°S
JANEIRO 5,35 4,01 5,72 4,29
FEVEREIRO 5,33 4,00 5,66 4,25
MARÇO 5,37 4,03 5,67 4,25
ABRIL 4,88 3,66 5,11 3,83
MAIO 4,15 3,11 4,29 3,22
JUNHO 3,71 2,78 3,92 2,94
JULHO 3,98 2,99 4,19 3,14
AGOSTO 4,93 3,70 5,12 3,84
SETEMBRO 4,58 3,44 4,73 3,55
OUTUBRO 5,03 3,77 5,24 3,93
NOVEMBRO 5,42 4,07 5,65 4,24
DEZEMBRO 5,40 4,05 5,66 4,25

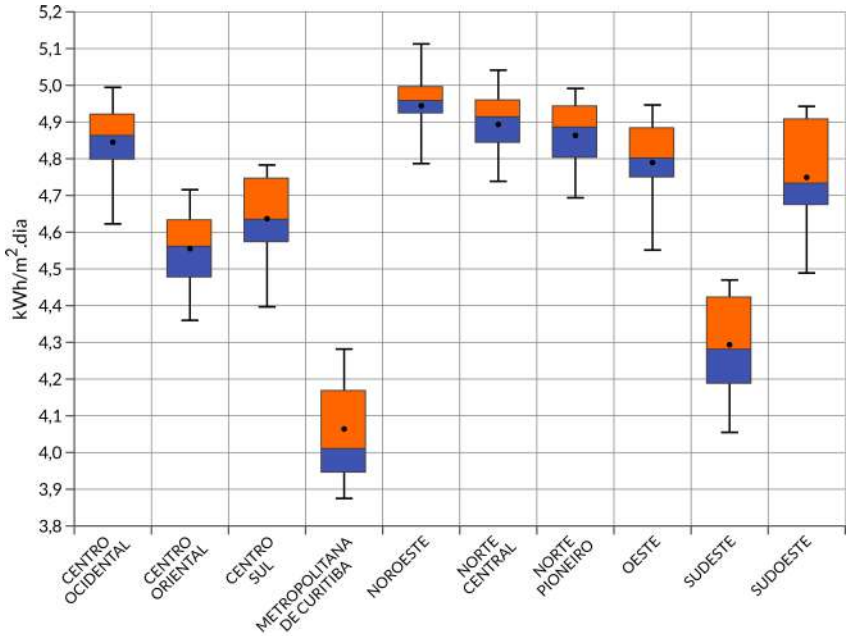
VARIABILIDADE INTERANUAL E TENDÊNCIAS

Este capítulo tem por finalidade avaliar a variação da irradiação solar incidente na superfície em torno dos valores médios anuais e sazonais e tendência dos valores médios anuais. O período considerado foi 2005 a 2015, menor que o total de anos empregados para a elaboração deste Atlas. Foram excluídos os anos iniciais de 1999 a 2004, devido ao fato de que as imagens do banco de dados de satélite possuem baixa resolução espacial e temporal, podendo introduzir tendências artificiais nas análises.

VARIABILIDADE INTERANUAL

Os dados apresentados na Figura 20 permitem a comparação da variabilidade interanual da média diária de irradiação solar global horizontal para cada uma das mesorregiões do Estado do Paraná. Nos gráficos da figura, os pontos centrais representam as médias no período, as linhas centrais representam as medianas, enquanto as caixas indicam os percentis P_{25} e P_{75} e as barras verticais os valores máximos e mínimos em torno da mediana.

Na análise dos dados nota-se que a mesorregião Noroeste apresenta menor variabilidade interanual, com 50% dos valores entre 4,92 kWh/m².dia e 5,00 kWh/m².dia, e valores mínimo e máximo entre 4,79 kW/m².dia e 5,11 kWh/m².dia, sendo também a mesorregião de maior média anual no Estado do Paraná. Em seguida, a mesorregião Norte Central, com variabilidade entre 4,84 kWh/m².dia e 4,96 kWh/m².dia e valores extremos entre 4,74 e 5,04 kWh/m².dia. As mesorregiões Norte Pioneiro, Oeste e Centro Ocidental também apresentam baixa variabilidade.



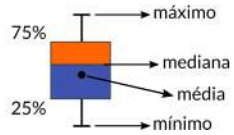


Figura 20. Variabilidade interanual da média diária de irradiação global horizontal ao longo dos anos de 2005 a 2015 para cada uma das mesorregiões do Estado do Paraná em kWh/m².dia.

Por outro lado, as mesorregiões Sudeste (4,19 kWh/m².dia e 4,42 kWh/m².dia), Sudoeste (4,68 kWh/m².dia e 4,91 kWh/m².dia) e Metropolitana de Curitiba (3,95 kWh/m².dia e 4,17 kWh/m².dia) apresentam as maiores variabilidades interanuais.

Os maiores limites máximos de irradiação solar global horizontal foram encontrados nas mesorregiões do Noroeste (5,11 kWh/m².dia), Norte Central (5,04 kWh/m².dia), Centro Ocidental (4,99 kWh/m².dia), Norte Pioneiro (4,99 kWh/m².dia), Oeste (4,95 kWh/m².dia) e Sudoeste (4,94 kWh/m².dia). Já os menores limites mínimos ocorrem nas mesorregiões Metropolitana de Curitiba (3,88 kWh/m².dia) e Sudeste (4,05 kWh/m².dia).

Nas figuras 21a e 21b são apresentadas as variabilidades interanuais em escala sazonal, ou seja, as médias diárias sazonais da irradiação em cada mesorregião geográfica do Estado do Paraná. No verão, observam-se as maiores variabilidades nas mesorregiões Centro Ocidental, Oeste e Sudeste e uma menor variabilidade nas mesorregiões Norte Pioneiro e Norte Central.

Os valores máximos de irradiação solar no verão são encontrados no Sudoeste, Noroeste e Oeste, chegando a 6,62 kWh/m².dia, enquanto os valores mínimos foram verificados nas mesorregiões Metropolitana de Curitiba e Sudeste, com 4,93 kWh/m².dia e 5,02 kWh/m².dia respectivamente.

Para o outono, todas as mesorregiões apresentam menor variabilidade em relação ao verão. As maiores variabilidades foram encontradas na Metropolitana de Curitiba, Sudeste e Centro Oriental. Nesta estação os valores máximos foram encontrados para as mesorregiões Noroeste (4,72 kWh/m².dia), Norte Pioneiro (4,70 kWh/m².dia) e Norte Central (4,69 kWh/m².dia).

As estações do outono e inverno apresentam os menores intervalos de variabilidade, enquanto as estações do verão e primavera apresentam uma maior variabilidade em todas as mesorregiões (maior dispersão medida pela distância entre as barras nas figuras). A menor variabilidade para as estações do outono e inverno pode ser explicada pela proximidade com o solstício de inverno (21 de junho) quando a irradiação solar é, naturalmente, menor e também pela atuação de fenômenos meteorológicos que ocasionam o aumento na nebulosidade, com a maior frequência de passagem de frentes frias que provocam uma redução acentuada da irradiação solar na superfície durante dias consecutivos.

Para a primavera, observa-se elevada incidência de irradiação solar global, abaixo apenas do verão, como esperado. A variabilidade é maior nas mesorregiões localizadas ao sul e centro do estado e menor nas mesorregiões ao norte. O valor máximo chega a 5,76 kWh/m².dia na mesorregião Noroeste, enquanto o valor mínimo chega a 3,79 kWh/m².dia na mesorregião Metropolitana de Curitiba.

TENDÊNCIAS POR MESORREGIÃO

Na figuras 22a e 22b são apresentadas as tendências das médias anuais da irradiação solar global, incidente ao longo do período de estudo, utilizando o método de Mann-Kendall [58][59]. Observa-se que todas as mesorregiões apresentam uma inclinação negativa na reta de regressão da irradiação solar global horizontal, o que sugere uma tendência negativa. Para as mesorregiões Sudoeste e Oeste verifica-se que houve tendência de diminuição da irradiação solar global, com uma taxa aproximada de -25 Wh/m² e -17 Wh/m² por ano e significância estatística de 5% e 10% respectivamente. Porém, para as demais mesorregiões, os testes aplicados não apresentaram significância estatística. Com isso, não se pode afirmar se está ocorrendo uma diminuição da irradiação solar global nessas mesorregiões.

Embora estatisticamente significativo, este resultado ainda não permite inferir uma conexão com os efeitos do aquecimento global [60] ou ao ciclo solar, já que a série temporal de irradiação solar utilizada não preenche os requisitos para uma análise de tendência histórica (séries com no mínimo 30 anos). Tais efeitos podem ser oriundos da variabilidade natural do sistema climático global.

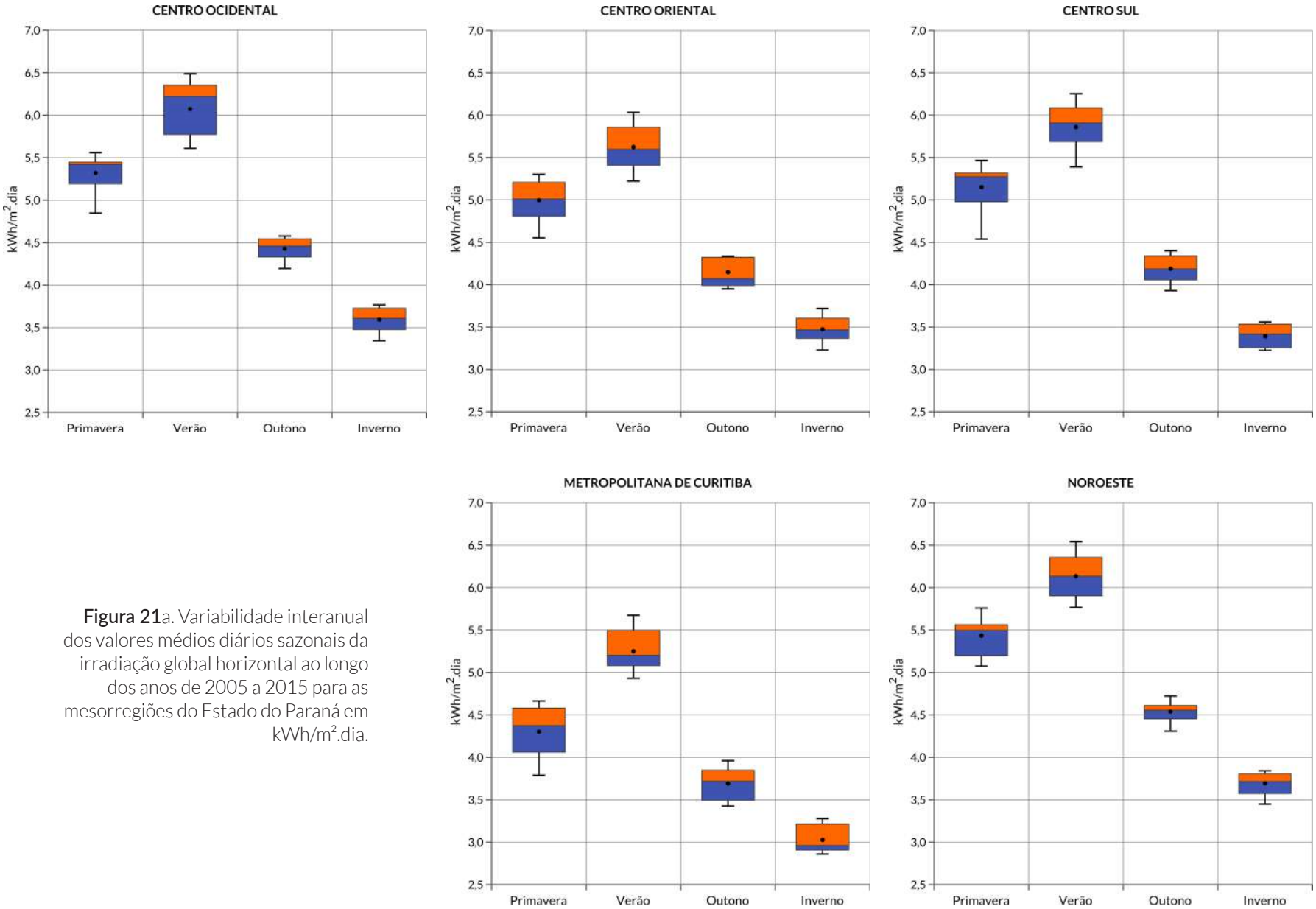


Figura 21a. Variabilidade interanual dos valores médios diários sazonais da irradiação global horizontal ao longo dos anos de 2005 a 2015 para as mesorregiões do Estado do Paraná em kWh/m².dia.

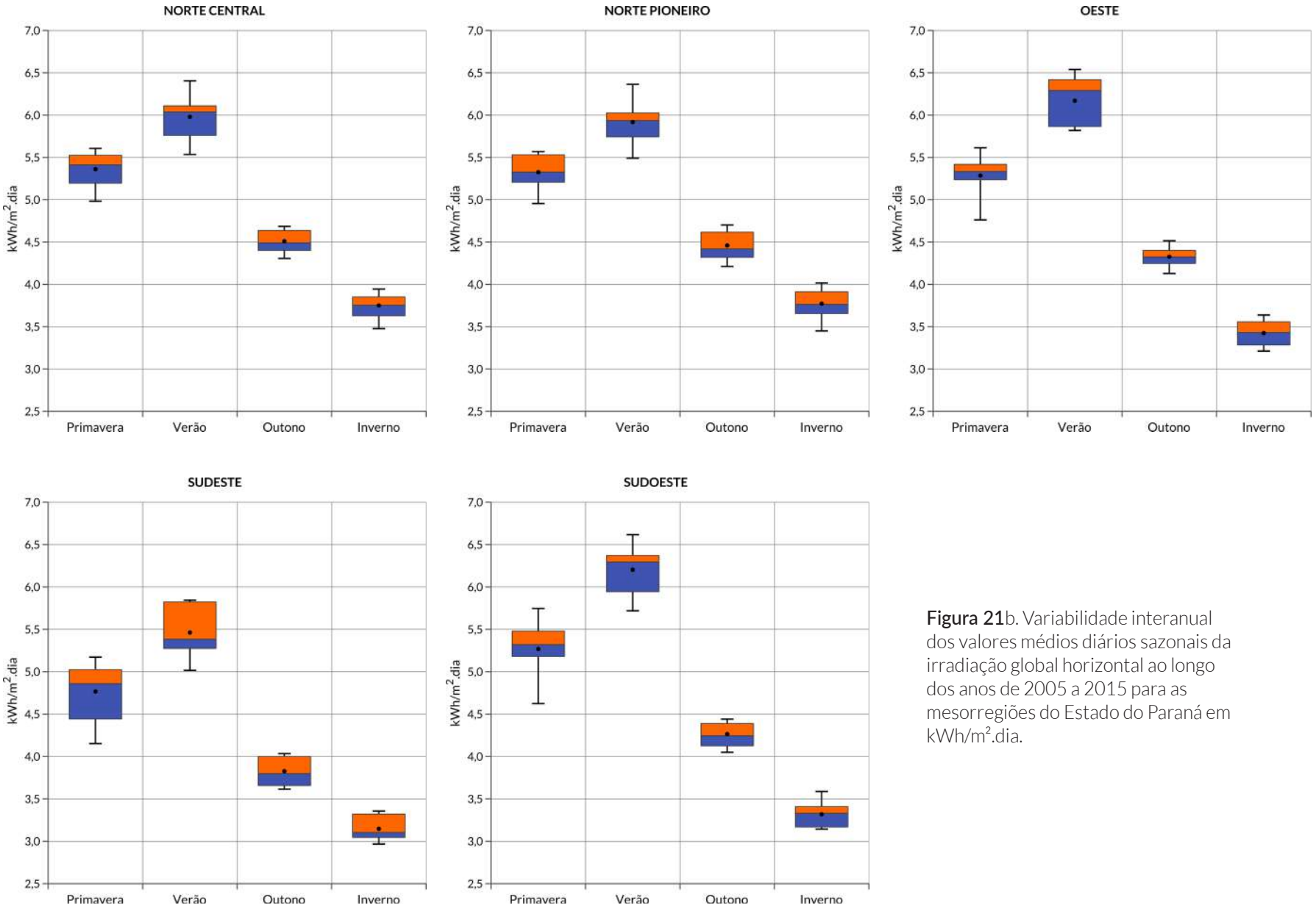


Figura 21b. Variabilidade interanual dos valores médios diários sazonais da irradiação global horizontal ao longo dos anos de 2005 a 2015 para as mesorregiões do Estado do Paraná em kWh/m².dia.

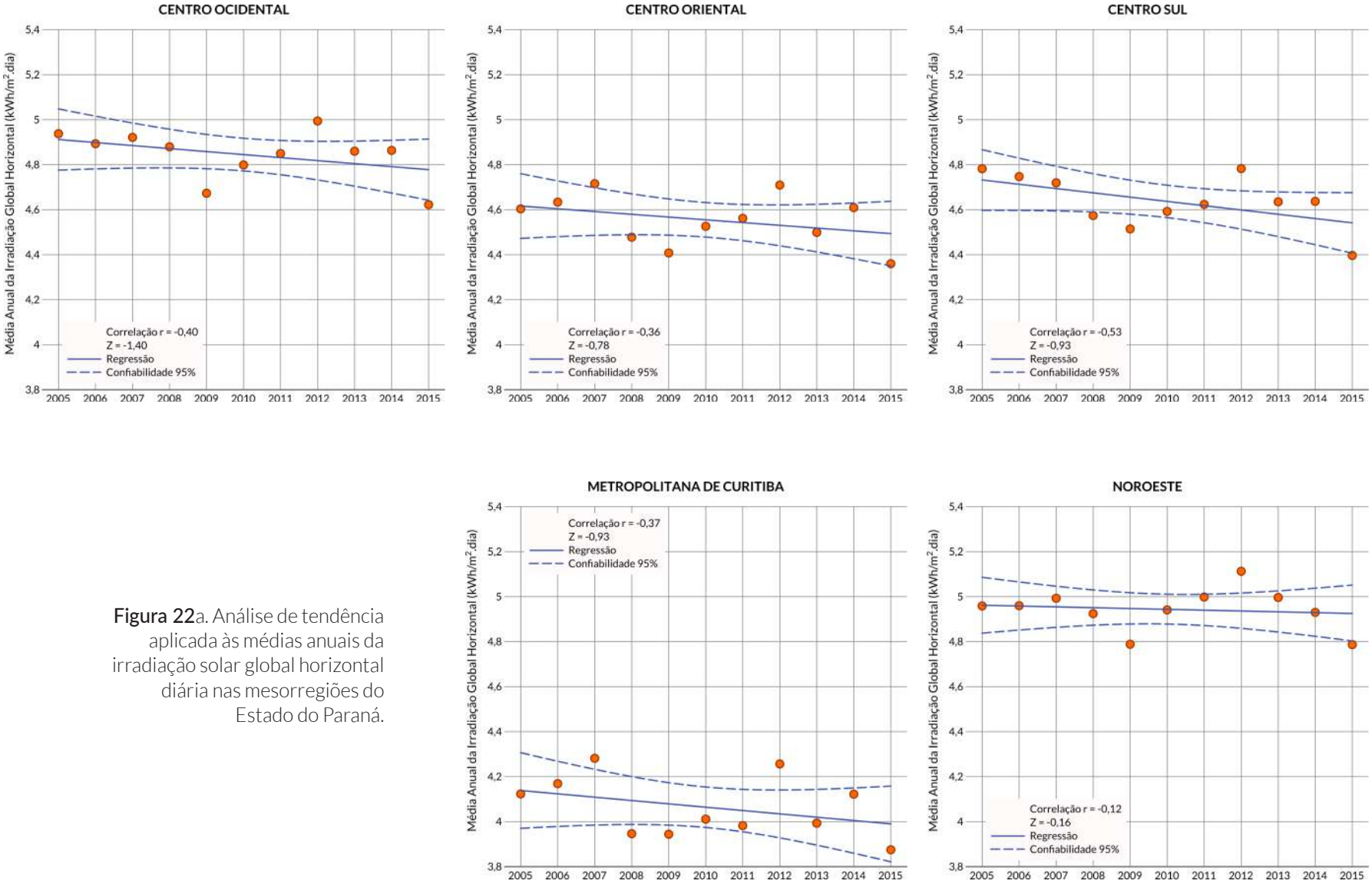


Figura 22a. Análise de tendência aplicada às médias anuais da irradiação solar global horizontal diária nas mesorregiões do Estado do Paraná.

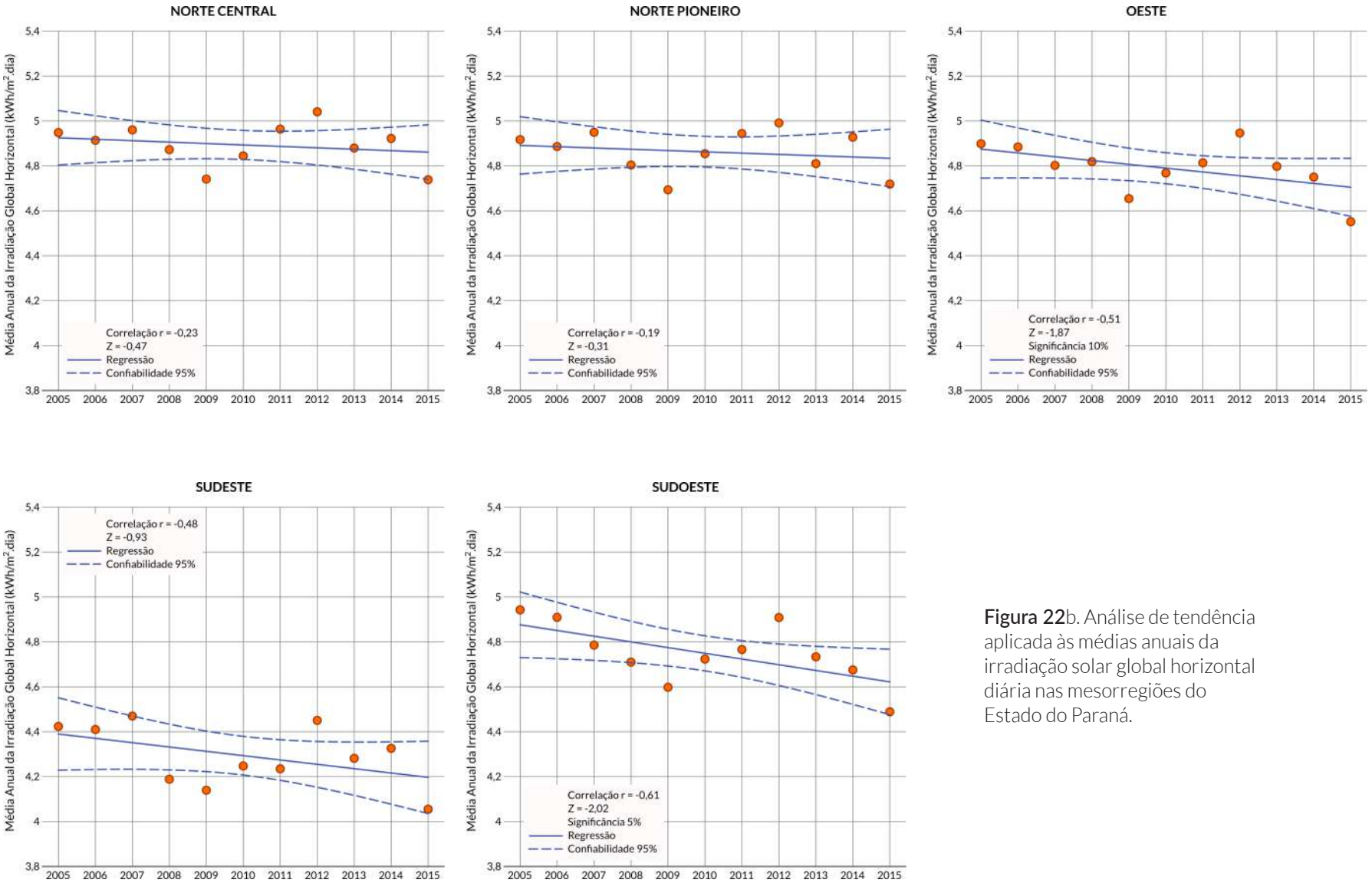


Figura 22b. Análise de tendência aplicada às médias anuais da irradiação solar global horizontal diária nas mesorregiões do Estado do Paraná.

ANÁLISE DOS MAPAS GERADOS

Através da observação dos mapas gerados com a distribuição da irradiação solar em todo o território do Estado do Paraná, é possível identificar particularidades importantes para cada tipo de irradiação analisada. O conhecimento dessas informações é fundamental para o desenvolvimento de projetos em energia solar, de acordo com o objetivo pretendido, seja na aplicação de sistemas de aquecimento com coletor solar, ou na geração de energia elétrica por meio de sistemas fotovoltaicos ou heliotérmicos.

IRRADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL

Os mapas de irradiação global horizontal mostram que o Estado do Paraná apresenta uma média anual de 1.705 kWh/m².ano, sendo que o valor máximo de irradiação anual encontra-se nos municípios de Itaguajé e Santa Inês, com 1.938 kWh/m².ano, e o valor mínimo encontra-se no município de Guaratuba, com 1.365 kWh/m².ano, sendo estes os valores extremos encontrados no estado.

Considerada a área de cada um dos 399 municípios do Paraná, a maior média de irradiação anual foi obtida nos municípios de Cafeara e Santa Inês, com 1.928 kWh/m².ano, enquanto a menor média foi encontrada no município de Guaratuba, com 1.441 kWh/m².ano. De forma análoga, foram determinados os valores médios de irradiação por mesorregião do estado, sendo que a maior média anual foi obtida na mesorregião Noroeste, com 1.802 kWh/m².ano, enquanto a menor média foi encontrada na mesorregião Metropolitana de Curitiba, com 1.492 kWh/m².ano.

Quanto ao comportamento sazonal da irradiação global horizontal no estado, observa-se os maiores valores diários médios durante o verão (5,88 kWh/m².dia) e primavera (5,10 kWh/m².dia), sendo os menores apresentados durante o inverno (3,47 kWh/m².dia) e outono (4,25 kWh/m².dia).

IRRADIAÇÃO DIRETA NORMAL

Os mapas de irradiação direta normal mostram que o Estado do Paraná apresenta como Média Anual o valor de 1.560 kWh/m².ano, sendo que o valor máximo de irradiação encontra-se no município de Diamante do Norte, com 1.838 kWh/m².ano, e o valor mínimo encontra-se no município de Guaratuba, com 772 kWh/m².ano, sendo estes os valores extremos encontrados no estado.

A maior média anual de irradiação incidente dentre os 399 municípios foi obtida no município de Cafeara, com 1.819 kWh/m².ano, e a menor média foi também encontrada no município de Guaratuba, com 918 kWh/m².ano.

Quanto aos valores médios de irradiação por mesorregião do estado, a maior média anual foi obtida na mesorregião Noroeste, com 1.753 kWh/m².ano, e a menor média foi encontrada na mesorregião Metropolitana de Curitiba com 1.105 kWh/m².ano.

Com relação ao comportamento sazonal da irradiação direta normal, observam-se os maiores valores diários médios durante o verão (4,74 kWh/m².dia) e outono (4,20 kWh/m².dia), sendo as menores durante o inverno (4,04 kWh/m².dia) e primavera (4,11 kWh/m².dia).

IRRADIAÇÃO DIFUSA

Os mapas de irradiação difusa mostram que o Estado do Paraná apresenta como Média Anual o valor de 695 kWh/m².ano, sendo que o valor máximo de irradiação anual encontra-se nos municípios de Bocaiúva do Sul, Cerro Azul e Tunas do Paraná, com 759 kWh/m².ano, e o valor mínimo encontra-se nos municípios de Foz do Iguaçu e Itaipulândia, com 638 kWh/m².ano, sendo estes os valores extremos encontrados no estado.

A maior média anual de irradiação incidente dentre os 399 municípios do Estado do Paraná foi obtida nos municípios de Piraquara e Quatro Barras, com 747 kWh/m².ano, enquanto a menor média foi encontrada no município de Itaipulândia, com 647 kWh/m².ano.

Quanto aos valores médios de irradiação por mesorregião do estado, a maior média anual foi obtida na mesorregião Metropolitana de Curitiba, com 736 kWh/m².ano, enquanto a menor média foi encontrada na mesorregião Sudoeste, com 671 kWh/m².ano.

Em relação ao comportamento sazonal de irradiação difusa, observam-se os maiores valores diários médios durante o verão (2,48 kWh/m².dia) e primavera (2,14 kWh/m².dia), sendo as menores médias apresentadas durante o inverno (1,32 kWh/m².dia) e outono (1,69 kWh/m².dia).

IRRADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE NO PLANO INLCINADO NA LATITUDE

Os mapas de irradiação e de produtividade no plano inclinado na latitude mostram que o Estado do Paraná apresenta como média anual respectivamente os valores de 1.789 kWh/m².ano e 1.342 kWh/kWp.ano, sendo que os valores máximos anuais encontram-se nos municípios de Itaguajé e Santa Inês, com 1.938 kWh/m².ano e 1.453 kWh/kWp.ano, enquanto os valores mínimos encontram-se no município de Guaratuba, com 1.365 kWh/m².ano e 1.024 kWh/kWp.ano, sendo estes os valores extremos encontrados no estado.

Considerada a média de irradiação incidente e de produtividade na área de cada um dos 399 municípios do Estado do Paraná, as maiores médias anuais foram obtidas nos municípios de Cafera e Santa Inês, com 1.928 kWh/m².ano e 1.446 kWh/kWp.ano, enquanto as menores médias foram encontradas no município de Guaratuba, com 1.441 kWh/m².ano e 1.080 kWh/kWp.ano respectivamente.

Com relação aos valores médios de irradiação e de produtividade por mesorregião, as maiores médias anuais foram obtidas na mesorregião Noroeste, com 1.885 kWh/m².ano e 1.413 kWh/kWp.ano, enquanto as menores médias foram encontradas na mesorregião Metropolitana de Curitiba, com 1.565 kWh/m².ano 1.174 kWh/kWp.ano.

Para cada mesorregião, foram identificados, ainda, os municípios com as maiores e menores médias anuais de irradiação e de produtividade, apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Média anual de irradiação e produtividade por mesorregião, com a identificação dos municípios com as maiores e menores médias.

Mesorregião	Média do Total Anual		Município	Média do Total Anual	
	Irradiação (kWh/m².ano)	Produtividade (kWh/kWp.ano)		Irradiação (kWh/m².ano)	Produtividade (kWh/kWp.ano)
NOROESTE	1.885	1.414	Diamante do Norte	1.919	1.439
			Francisco Alves	1.851	1.388
NORTE CENTRAL	1.876	1.407	Cafeara	1.928	1.446
			Cândido de Abreu	1.810	1.357
NORTE PIONEIRO	1.866	1.400	Sertaneja	1.908	1.431
			Figueira	1.811	1.358
CENTRO OCIDENTAL	1.856	1.392	Terra Boa	1.875	1.406
			Nova Cantu	1.834	1.376
OESTE	1.825	1.369	Formosa do Oeste	1.854	1.390
			Lindoeste	1.795	1.347
SUDOESTE	1.816	1.362	Bela Vista da Caroba	1.829	1.372
			Marmeleiro	1.800	1.350
CENTRO-SUL	1.783	1.337	Laranjal	1.843	1.382
			Inácio Martins	1.661	1.246
CENTRO ORIENTAL	1.752	1.314	Ortigueira	1.818	1.363
			Castro	1.661	1.246
SUDESTE	1.649	1.237	Ivaí	1.747	1.310
			Paulo Frontin	1.552	1.164
METROPOLITANA DE CURITIBA	1.565	1.174	Porto Amazonas	1.654	1.241
			Guaratuba	1.441	1.080

Quanto ao comportamento sazonal de irradiação e produtividade no plano inclinado na latitude, observam-se os maiores valores diários médios durante o verão (5,33 kWh/m².dia e 4,00 kWh/kWp.dia) e primavera (5,01 kWh/m².dia e 3,76 kWh/kWp.dia), sendo as menores durante o inverno (4,41 kWh/m².dia e 3,31 kWh/kWp.dia) e outono (4,86 kWh/m².dia e 3,65 kWh/kWp.dia).

Na Figura 23 é apresentado o resumo do potencial anual médio de energia solar no Estado do Paraná e nas respectivas mesorregiões, para o período de 17 anos em que este Atlas se baseia.

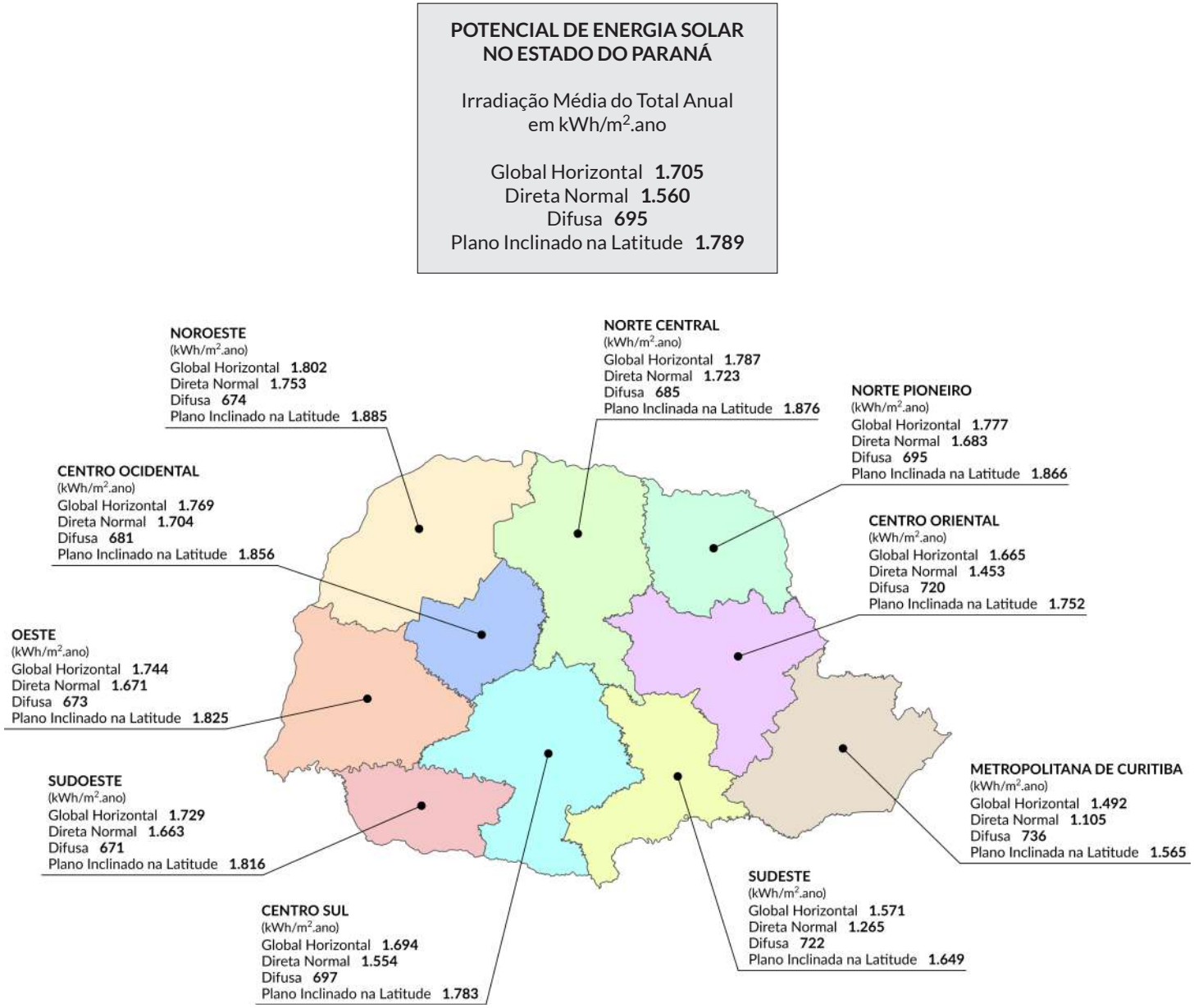


Figura 23. Potencial anual médio de energia solar no Estado do Paraná e nas mesorregiões [36][37].

COMPARAÇÃO ENTRE POTENCIAIS SOLARES

Nos últimos anos, muito tem sido discutido sobre o real potencial de geração de energia elétrica por fonte solar fotovoltaica no Estado do Paraná. Pesquisas recentes demonstravam o grande potencial do estado, o que auxiliou a impulsionar a disseminação desta fonte renovável de energia nos últimos anos.

Este potencial fica ainda mais evidente quando são realizadas comparações com regiões que são referência nesta tecnologia, em especial a Europa que, nas últimas duas décadas, vem apoiando intensamente pesquisas e o desenvolvimento desta tecnologia mediante políticas públicas.

Dentre os 10 países com maior capacidade instalada em 2016, cinco são europeus: Alemanha, Itália, Reino Unido, França e Espanha. Juntos, esses países representam, aproximadamente, 28% da capacidade instalada global em sistemas fotovoltaicos [28] [29].

Para comparação dos dados de irradiação e de produtividade estimada anual do Estado do Paraná com os da Europa, foram utilizados os valores da irradiação e de produtividade média anual, estimados para SFVCR de 1 kWp de potência, com inclinação igual à latitude do local, orientado para a linha do equador, sem sombreamento, e com taxa de desempenho de 75%. Os mapas elaborados com estas premissas para o Paraná e para a Europa utilizam a mesma escala de valores e de cores e são apresentados na Figura 24.

Ao comparar as médias obtidas no Estado do Paraná com as obtidas nos principais países europeus, pôde-se verificar que a média obtida no estado é 43,00% superior à da Alemanha; 2,22% superior à da Itália; 55,11% superior à do Reino Unido; 18,25% superior à da França e 8,14% inferior à da Espanha.

Na Tabela 2 são mostrados os valores de irradiação e de produtividade média anual obtidos no Estado do Paraná e nos países europeus analisados. Há também uma coluna comparativa com a diferença percentual entre a média apresentada no Paraná e a média obtida em cada país.

Apenas seis países europeus, dos 33 analisados nesse levantamento, têm média acima do Estado do Paraná, ou seja, a média do estado é superior à de 27 países, inclusive aqueles onde o uso das tecnologias de aproveitamento da energia solar é bastante difundido, o que confirma o grande potencial fotovoltaico existente no território paranaense.

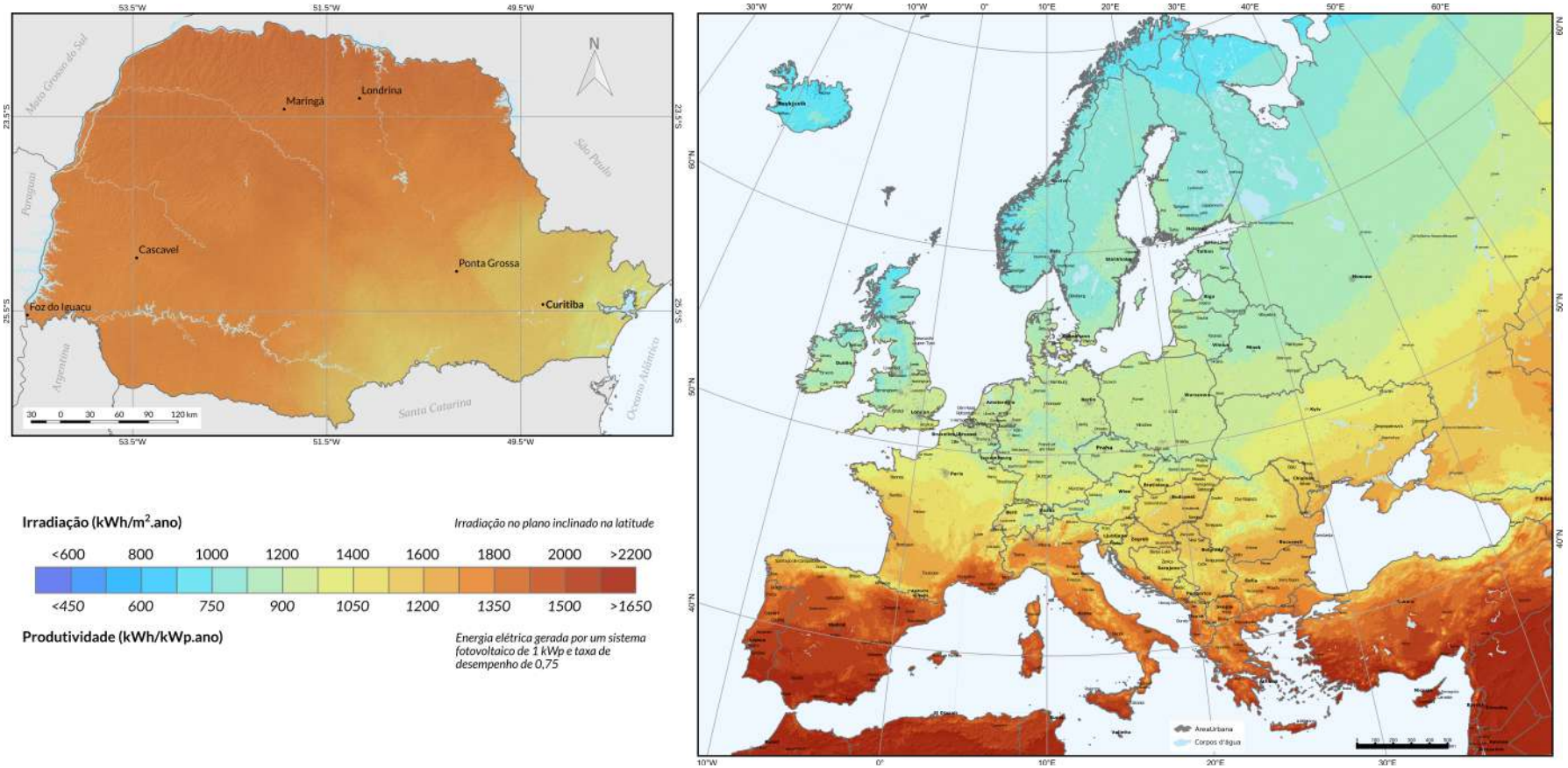


Figura 24. Mapas de Irradiação e de Produtividade para o Estado do Paraná e para a Europa - Valores Anuais [61] [62].

Tabela 2. Valores de irradiação e de produtividade estimada média anual no plano inclinado na latitude, para uma taxa de desempenho de 75%, encontrados no Paraná e nos países da Europa [63].

Paraná / País Europeu	Média Anual no Plano Inclinado na Latitude		Diferença Percentual entre a Média Anual no Paraná e no País Europeu
	Irradiação (kWh/m².ano)	Produtividade (kWh/kWp.ano)	
Paraná	1.789	1.342	
Chipre	2.217	1.663	-19,31%
Malta	2.155	1.617	-17,00%
Portugal	1.996	1.497	-10,38%
Espanha	1.948	1.461	-8,14%
Grécia	1.897	1.423	-5,68%
Turquia	1.873	1.405	-4,47%
Itália	1.750	1.313	2,22%
Macedónia	1.696	1.272	5,47%
Bulgária	1.631	1.223	9,71%
Croácia	1.570	1.178	13,93%
Montenegro	1.563	1.172	14,45%
Sérvia	1.531	1.148	16,83%
França	1.513	1.135	18,25%
Roménia	1.496	1.122	19,60%
Hungria	1.490	1.117	20,10%
Eslovênia	1.444	1.083	23,90%
Eslováquia	1.333	1.000	34,17%
Áustria	1.325	994	35,00%
República Tcheca	1.256	942	42,44%
Polônia	1.252	939	42,85%
Alemanha	1.251	938	43,00%
Luxemburgo	1.243	932	43,94%
Holanda	1.242	931	44,06%
Bélgica	1.238	928	44,54%
Dinamarca	1.211	908	47,73%
Lituânia	1.183	887	51,28%
Letónia	1.175	881	52,23%
Irlanda	1.174	880	52,42%
Reino Unido	1.153	865	55,11%
Estônia	1.151	864	55,36%
Suécia	1.084	813	64,99%
Finlândia	1.054	790	69,81%
Islândia	949	712	88,43%

SISTEMA ELÉTRICO E DISTRIBUIÇÃO DA IRRADIAÇÃO

Uma possibilidade bastante interessante surgida no desenvolvimento deste projeto foi a de aliar a visão do sistema elétrico paranaense à distribuição da irradiação solar no plano inclinado na latitude, irradiação esta utilizada em projetos de SFVCR, conforme já discutido ao longo deste Atlas. Essa visualização simultânea viabiliza a percepção de duas importantes informações: a infraestrutura física do sistema elétrico existente e os valores desse tipo de irradiação nas diversas regiões do estado.

Com isto, podem ser observadas em um mesmo mapa, as unidades geradoras das várias fontes de energia, linhas de transmissão, subestações existentes e a irradiação e produtividade de SFVCR em cada local do estado. Essas informações são apresentadas na Figura 25.

Tanto o poder público como o privado poderão avaliar quais são os lugares com maior probabilidade de disseminação da tecnologia fotovoltaica em função da população, do PIB gerado, dos níveis de irradiação e da rapidez de conexão dos sistemas à rede elétrica existente nas diversas áreas do estado.

A visão compartilhada dessas duas informações, infraestrutura elétrica e distribuição da irradiação, possibilita ao poder público e às concessionárias de energia locais antever, por exemplo, onde maiores investimentos serão necessários de forma a atender ao despacho desta nova energia gerada, seja na forma de geração distribuída ou por meio de grandes usinas, aliadas à visão da inserção em massa de SFVCR no Paraná. Fluxos de potência em condições diferentes dos usuais ocorrerão, fazendo com que novas análises sejam necessárias, visto ser uma fonte intermitente de energia.

A disseminação da fonte de energia solar fará com que novas oportunidades de negócios ocorram em todo o estado, gerando mais empregos e renda para a população e, por conseguinte, maior arrecadação para municípios e para o próprio estado.

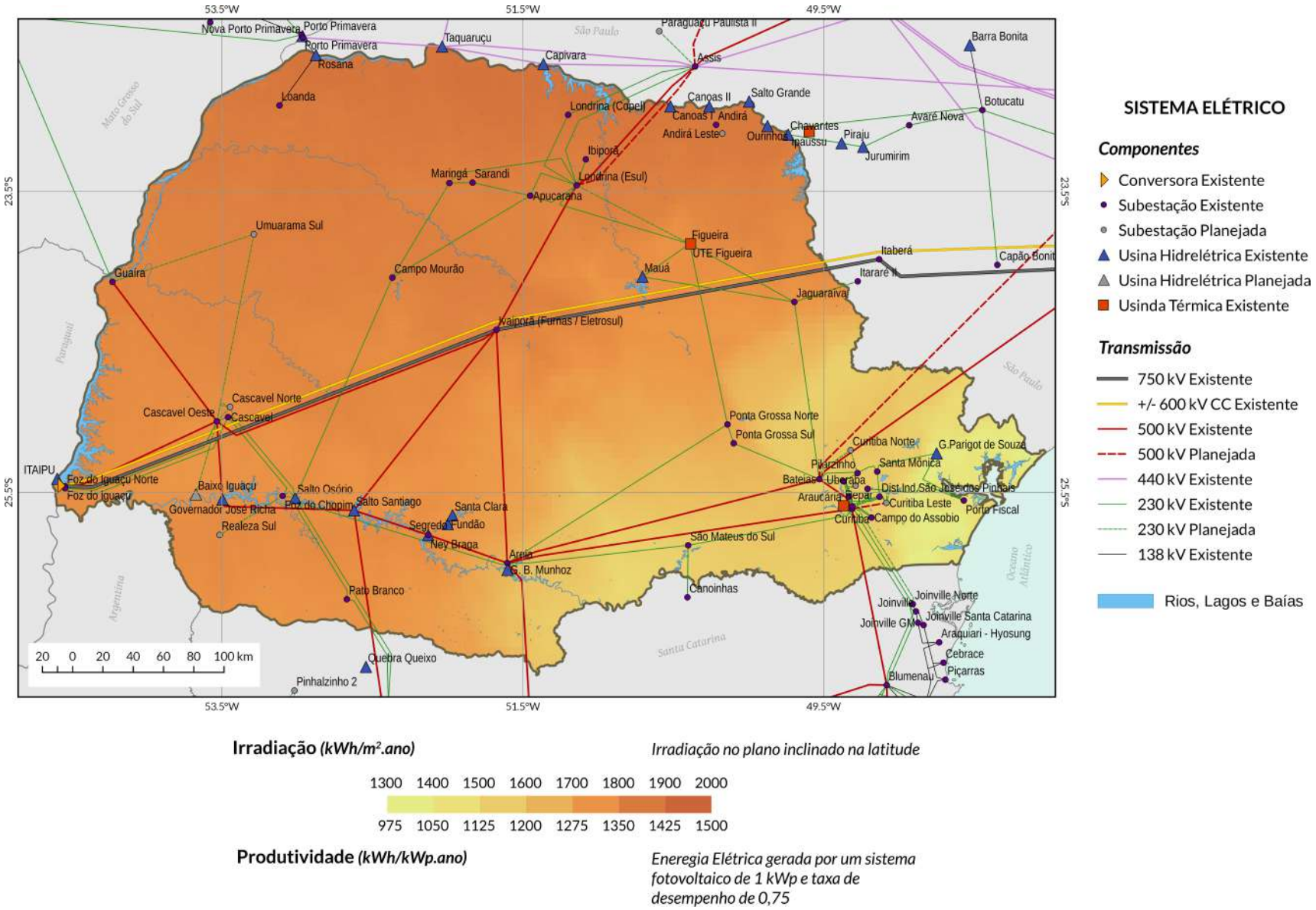


Figura 25. Mapa com a representação do sistema elétrico e da irradiação no plano inclinado na latitude no Estado do Paraná [36][46].

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo das últimas décadas grandes discussões em relação ao meio ambiente e sobre a preservação dos recursos naturais têm ocorrido e, atualmente, existe um consenso quanto a "satisfazer as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras em satisfazer suas próprias necessidades".

Diante disto, a sociedade tem trabalhado na busca por fontes renováveis de energia, com os menores impactos possíveis ao meio ambiente de forma a alicerçar o seu desenvolvimento, dentre elas a solar.

Esta fonte se apresenta como uma energia limpa e renovável, capaz de gerar energia na forma de calor para aquecimento de casas e em processos industriais ou, ainda, gerar eletricidade através de sistemas fotovoltaicos ou heliotérmicos.

As primeiras pesquisas sobre energia solar no Brasil remontam à década de 50, se intensificando na década de 70 em função da crise do petróleo, quando o governo brasileiro forneceu vários incentivos para o desenvolvimento de fontes alternativas de energia. Neste período, houve importantes avanços nesta área, que culminaram com a instalação de 20 estações da Rede Solarimétrica Nacional que passaram a operar em 1977. O Estado do Paraná teve duas destas estações implantadas em seu território, uma em Curitiba e outra em Foz do Iguaçu [20], o que já demonstrava o interesse técnico-científico por esta fonte e a necessidade em se determinar os índices de radiação solar em superfície também no estado.

Durante muitos anos, a utilização da energia solar no Brasil foi, em sua maior parte, para aquecimento de água em residências e aplicações em sistemas fotovoltaicos isolados, voltados basicamente a atender estações de telecomunicações instalados em locais remotos.

Foi o lançamento da Resolução 482/2012 na ANEEL, que permite e regulamenta a conexão de micro e mini geradores de energia elétrica à rede de distribuição, que impulsionou esta fonte de energia renovável, através de SFVCR. Com isso milhares de sistemas já foram instalados no Brasil, sendo aproximandamente 10% deles no Paraná, os quais necessitam de informações precisas e atualizadas sobre as estimativas da radiação solar em superfície para o desenvolvimento destes projetos.

O levantamento de dados de radiação solar por meio de modelos estatísticos ou físicos utiliza metodologias distintas. Modelos físicos parametrizam processos e buscam resolver as equações que definem a passagem e interação da radiação solar com a atmosfera.

Os modelos estatísticos buscam uma relação entre a radiação solar medida em solo através de radiômetros e a obtida por modelos físicos ou dados de satélites. A partir daí, derivam uma relação empírica que permite obter valores da radiação incidente para a região de estudo. Deve-se ressaltar que a metodologia estatística tem os resultados válidos apenas para a região de estudo onde foi realizado o ajuste, enquanto nos modelos físicos

essa dependência não existe e tem representatividade espacial abrangente. Dessa forma, o melhor desempenho provém da combinação dos métodos, onde dados radiométricos medidos em superfície são necessários para o pós-processamento dos resultados dos modelos visando a eliminação de desvios sistemáticos e para estimativa das incertezas.

Este Atlas empregou um modelo físico por sensoriamento remoto (BRASIL-SR) e, por conseguinte, os dados gerados independeram de medidas radiométricas em superfície. Entretanto, os ajustes de pós-processamento e as estimativas das incertezas dependeram desses dados. Infelizmente, o Estado do Paraná não possui uma rede radiométrica específica de alta confiabilidade, fornecendo dados para as várias componentes da irradiação solar incidente e espacialmente distribuída, exceto pela estação de coleta da rede SONDA operada pelo TECPAR. Isso levou os autores a buscar dados de radiação solar obtidos por estações meteorológicas automáticas da rede nacional mantida e operada pelo INMET. Essa rede, de abrangência nacional, fornece dados de radiação global no plano horizontal para fins de estudos meteorológicos e, portanto, não atende aos requisitos de alta confiabilidade estabelecidos pela BSRN (*Baseline Surface Radiation Network*). Dessa forma, estas medidas tiveram que passar por um rigoroso controle de qualidade antes de sua utilização para o pós-processamento e estimativas de incertezas dos dados gerados por esse Atlas. Essa escassez de dados impacta, particularmente, nos ajustes para as estimativas da radiação direta normal do modelo, já que a maioria das estações meteorológicas tipicamente não fornece dados dessa componente da radiação solar.

Com isto, seria importante para o Estado do Paraná a criação de uma rede de estações solarimétricos própria, de alto desempenho, que poderia integrar a rede SONDA. Desta forma, seria possível obter dados de superfície com maior acurácia, possibilitando a atualização das informações geradas por este projeto.

As informações apresentadas por esta publicação mostram os valores elevados de irradiação encontrados no Paraná, com destaque para a mesorregião Noroeste, que apresentou a maior média anual e menor variabilidade da irradiação global horizontal, e também a maior média anual no plano inclinado na latitude do estado.

Os valores de irradiação encontrados em toda a região Norte e em direção ao Oeste do estado fazem com que a média de todo o estado seja superior a grande parte dos países europeus.

Os valores de produtividade estimada apresentados no Atlas mostram que a média anual encontrada no Paraná é inferior somente às encontradas em Chipre, Malta, Portugal, Espanha, Grécia e Turquia, sendo superior aos demais 27 países contidos nesta análise e cujos percentuais variam entre 2,22% (caso da Itália) e 88,43% (caso da Islândia), o que mostra o grande potencial existente no estado quando comparado à Europa.

Esta comparação foi possível ao se utilizar uma mesma taxa de desempenho. Entretanto, cabe ressaltar que um dos fatores de perdas em sistemas fotovoltaicos é a temperatura, a qual influencia diretamente na produtividade apresentada. Pesquisas apontam que sistemas fotovoltaicos que utilizam módulos de silício cristalino (monocristalino e policristalino) estão sujeitos a apresentar um desempenho menor com o aumento da temperatura (acima dos 25°, temperatura padrão de teste). Outras tecnologias encontradas no mercado, como as de filme fino de silício amorfo, são menos suscetíveis a este fator. Com isto, sistemas fotovoltaicos que utilizam tecnologia de célula de silício cristalino tendem a ter desempenho menor em locais onde historicamente a temperatura média é maior em comparação a locais cujas temperaturas médias se apresentam mais amenas, como é o caso de Curitiba.

Comparando-se os mapas sazonais elaborados no Estado do Paraná para cada uma das componentes da radiação solar, observou-se que em todos os casos os valores diários médios no

Verão foram superiores aos apresentados na Primavera, Outono e Inverno, condição característica do Paraná por se encontrar no sul do Brasil.

Em relação à exploração de usinas solares no estado, é imprescindível que sejam realizados estudos específicos levando-se em consideração a utilização de SFVCR com seguidor solar (dispositivo que acompanha o movimento do sol), que aumenta a incidência da irradiação solar na superfície do painel fotovoltaico e, por conseguinte, aumenta a sua produtividade. Apenas mediante estas informações será possível determinar, em cada região do estado, qual é o melhor modelo de implantação para grandes plantas de SFVCR: sistemas fixos ou com rastreador solar (de um ou dois eixos), visto que os valores de irradiação anual e os custos de implantação, operação e manutenção destes sistemas são diferentes, os quais influenciam na análise de viabilidade técnica/econômica do empreendimento e, consequentemente, no retorno financeiro.

Cabe, ainda, ressaltar a contribuição da energia elétrica fotovoltaica na redução do pico de demanda na curva de carga da concessionária de energia, especialmente em horários de grande consumo de energia elétrica como, por exemplo, em horário comercial. Neste período, a realização dos processos produtivos e a utilização de ar condicionado são intensos e coincidem com os períodos de maior incidência da radiação solar ao longo do dia, fazendo desta fonte uma ótima aliada para o sistema elétrico e na diversificação da matriz elétrica brasileira.

AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos à Itaipu Binacional, ao Diretor Geral Brasileiro Sr. Luiz Fernando Vianna e ao seu antecessor Sr. Jorge Miguel Samek, ao Superintendente de Energias Renováveis Sr. Paulo Afonso Schmidt, aos seus antecessores Sr. Herlon Goelzer de Almeida e Sr. Cícero Bley Junior, a toda equipe da Itaipu, pelo apoio financeiro e a visão compartilhada de desenvolvermos um mundo melhor.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Curitiba, pelo apoio e disponibilidade da infraestrutura necessária para a realização das diversas pesquisas que são conduzidas nesta área, por meio do Grupo de Pesquisa em Energia Solar e Sistemas Fotovoltaicos e do Laboratório de Energia Solar (LABENS).

Ao Parque Tecnológico Itaipu e ao Centro Internacional de Hidroinformática (CIH), pelo apoio e pela parceria realizada, cujas pesquisas ainda muito nos reserva.

Finalmente, os nossos agradecimentos ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, por meio do Centro de Ciência do Sistema Terrestre e do Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN), sob a coordenação do Dr. Enio Bueno Pereira e de toda a equipe pelo exemplo de parceria e por compartilharem anos de pesquisa e conhecimento para o desenvolvimento deste Atlas, de extrema importância para o Estado do Paraná, cujos resultados gerados vão além da nossa imaginação.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

1. VAN BELLEN, H. M. “Indicadores de Sustentabilidade. Uma análise comparativa”, Rio de Janeiro, Editora FGV, 2ª edição, 2006.

2. GLENN, J.C.; GORDON, T.J.; FLORESCU, E. “Futures studies around the World”, In: 2011 State of the future, Washington, EUA, The millennium project, Global futures studies & research, cap. 7, 2011. Disponível em <http://www.millennium-project.org/millennium/2011SOF.html>. Acesso em junho 2014.

3. TIEPOLO, G.; CANCIGLIERI, O. “Fontes renováveis de energia - tendências e perspectivas para o planejamento energético emergente no Brasil”, Revista SODEBRAS, Volume 7, nº 77, Edição maio, ISSN 1809-3957, 2012.

4. MME, Ministério de Minas e Energias. “Balanço Energético Nacional 2011: ano base 2010”, 2011. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2011.pdf>. Acesso em março 2016.

5. MME, Ministério de Minas e Energias. “Balanço Energético Nacional 2012: ano base 2011”, 2012. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf>. Acesso em março 2016.

6. MME, Ministério de Minas e Energias. “Balanço Energético Nacional 2013: Base ano 2012”, 2013. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf>. Acesso em março 2016.

7. MME, Ministério de Minas e Energias. “Balanço Energético Nacional 2014: Ano base 2013”, 2014, Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf>. Acesso em março 2016.

8. MME, Ministério de Minas e Energias. “Balanço Energético Nacional 2015: Ano base 2014”, 2015. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf>. Acesso em março 2016.

9. MME, Ministério de Minas e Energias. “Balanço Energético Nacional 2016: Ano base 2015 - Relatório Síntese”, 2016. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/S%c3%adntese%20do%20Relat%c3%b3rio%20Final_2016_Web.pdf>. Acesso em agosto 2016.

10. REN21, “Renewable 2011 – Global Status Report”, 2011. Disponível em <http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR2011_FINAL.pdf>. Acesso em março 2016.

11. REN21, “Renewable 2012 – Global Status Report”, 2012. Disponível em <http://www.ren21.net/Portals/0/documents/activities/gsr/GSR2012_low%20res_FINAL.pdf>. Acesso em março 2016.

12. REN21, “Renewable 2013 – Global Status Report”, 2013. Disponível em <http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2013/GSR2013_lowres.pdf>. Acesso em março 2016.

13. REN21, “Renewable 2014 – Global Status Report”, 2014. Disponível em <http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full%20report_low%20res.pdf>.

Acesso em março 2016.

14. REN21, “Renewable 2015 – Global Status Report”, 2015. Disponível em <http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015_Onlinebook_low1.pdf>. Acesso em março 2016.

15. REN21, “Renewable 2016 – Global Status Report”, 2016. Disponível em <http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_Full_Report_REN21.pdf>. Acesso em agosto 2016.

16. MME, Ministério de Minas e Energias. "Balanço Energético Nacional - Série Completa", Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 1970-2015. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/BENSeriesCompletas.aspx>. Acesso em maio 2017.

17. MME, Ministério de Minas e Energias. "Demanda de Energia 2050", Nota Técnica DEA 13/15, Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2016. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/DEA%2013-15%20Demanda%20de%20Energia%202050.pdf>. Acesso em maio 2017.

18. ITAIPU. "Produção Anual de Energia". Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/energia/geracao>. Acesso em março 2017.

19. URBANETZ, J. "Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade", Tese de doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, 2010.

20. TIEPOLO, G. "Estudo do potencial de geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no Estado do Paraná", Tese (doutorado), Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas - PPGEPS, Curitiba, 2015.

21. PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. “Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos”, 2014. Disponível em <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em fevereiro 2014.

22. GREENPRO. “Energia Fotovoltaica – Manual sobre Tecnologias, Projecto e Instalação”, Comissão Europeia, Fontes de Energia Renováveis, 2004. Disponível em <http://paginas.fe.up.pt/~ee03097/ficheiros/manual-fotovoltaico.pdf>. Acesso em abril 2014.

23. DGS. “Planning and installing photovoltiac systems : a guide for installers, architects, and engineers”, Deutsche Gesellschaft fur Sonnenenergie, ISBN-13: 978-1-84407-442-6, Second Edition, 2008.

24. GOSWAMI, D. Y.; KREITH, F.; KREIDER, J. F. “Principles of Solar Engineering”, ISBN 1-56032-714-6, 2000.

25. NREL. “Glossary of Solar Radiation Resource Terms: National Renewable Energy Laboratory”, 2017. Disponível em: <http://rredc.nrel.gov/solar/glossary/gloss_s.html>. Acesso em março 2017.

26. TRENBERTH, K. E.; FASULLO, J. T.; KIEHL, J. "Earth´s global energy budget", Bulletin of the American Meteorological Society. Março de 2009. Disponível em: <http://www.cgd.ucar.edu/staff/trenbert/trenberth.papers/TFK_bams09.pdf>. Acesso em setembro/2016.

27. EIA - U.S. Energy Information Administration. "International Energy Outlook 2016". With Projections to 2040. Maio 2016. Disponível em <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2016).pdf>. Acesso em setembro 2016.

28. REN21, “Renewable 2017 – Global Status Report”, 2017. Disponível em < http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/170607_GSR_2017_Full_Report.pdf>. Acesso em junho 2017.

29. IEA - International Energy Agency. “Snapshot of Global Photovoltaic Markets”. 5th Edition - 2017, IEA PVPS Snapshot Report 2017 Tables Figures 1. Disponível em < http://www.iea-pvps.org/index.php?id=266 >. Acesso em junho 2017.

30. IEA - International Energy Agency. “Technology Roadmap - Solar Photovoltaic Energy”. 2014 Edition. Disponível em < https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/

TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf>. Acesso em setembro 2016.

31. ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. "Registros de Micro e Minigeradores distribuídos efetivados na ANEEL". Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/scg/rcgMicro.asp>. Acesso em abril 2017.

32. PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RÜTHER, R. "Atlas Brasileiro de Energia Solar", São José dos Campos, 1ª Edição, p. 34, 2006, Disponível online em http://www.ccst.inpe.br/wp-content/themes/ccst-2.0/pdf/atlas_solar-reduced.pdf. Acesso em setembro 2016.

33. BRASIL. "LEI N° 13.169, DE 6 DE OUTUBRO DE 2015, Artigo 8". 2015. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2015/Lei/L13169.htm>. Acesso em outubro 2016.

34. CONFAZ - Conselho Nacional de Política Fazendária. "Convênio ICMS 16". Disponível em <https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/2015/cv016_15>. Acesso em outubro 2016.

35. IPARDES. "Anuário Estatístico do Paraná 2015", 2015, Disponível em <http://www.ipardes.pr.gov.br/anuario_2015/index.html>. Acesso em março 2017.

36. IBGE/DGC. "Base Cartográfica Contínua, ao milionésimo – BCIM", versão 4.0. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/cartas_e_mapas/bases_cartograficas_continuas/bcim/versao2014/bcim_v4_shapefile.zip>. Acesso em junho 2015.

37. MALHA municipal digital do Brasil: situação em 2010. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/organizacao_do_territorio/malhas_territoriais/malhas_municipais/municipio_2010/pr/>. Acesso em junho 2015.

38. CENSO DEMOGRÁFICO 2010. "Características da população e dos domicílios: resultados do universo". Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/resultados_dou/PR2010.pdf>. Acesso em novembro 2015.

39. CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. "Tempo e clima no Brasil". São Paulo: Oficina de Textos, 2009, cap. 13, p. 197-212.

40. SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) com resolução de 90 metros (versão 4.1). Fonte: Jarvis A., H.I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara, 2008, Hole-filled seamless SRTM data V4, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT). Disponível em: <http://srtm.csi.cgiar.org>. Acesso em janeiro 2016.

41. INMET. "Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990". Brasília, DF: INMET, 2009. 465p.

42. MANOSSO, F. C. "Distribuição Espacial e Temporal da Precipitação e Temperatura Média na Região da Serra do Cadeado (PR)". Revista Brasileira de Climatologia, ano 9, vol.12, 2013.

43. SEMA - Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. "Bacias Hidrográficas do Paraná - Série Histórica", 2a Edição, 2013. Disponível em: <http://www.meioambiente.pr.gov.br/arquivos/File/corh/Revista_Bacias_Hidrograficas_2015.pdf>. Acesso em março 2017.

44. SANTOS JR, C. E. S. SEED/PR - PDE 2007. Disponível em: <http://www.diaadiaeducacao.pr.gov.br/portals/pde/arquivos/1127-2.pdf.> Acesso em março 2017.

45. MME, Ministério de Minas e Energias. "Balanço Energético Nacional 2016: Ano base 2015", 2016. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf>. Acesso em setembro 2016.

46. ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. "Mapas Geoelétricos, Rede de Operação - Horizonte 2015". Disponível em: <http://www.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx>. Acesso em junho 2015.

47. MORAES, L. C. L.; GAIO, J. N.; TIEPOLO, G.; URBANETZ Jr, J.; PEREIRA, E. B.; PEREIRA, S. V.; ALVES, A. R. "Contribuição da Fonte Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica do Estado do Paraná no Horizonte 2050", CIEI&EXPO 2016 – Smart Energy, Conferência Internacional de Energias Inteligentes. Curitiba, novembro, 2016.

48. STUHLMANN, R.; RIELAND, M.; RASCHKE, E. "An improvement of the IGMK model to derive total and diffuse solar radiation at the surface from satellite data". J. Appl. Meteor. 29, 1990.

49. MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; STUHLMANN, R. "Parameterization of biomass burning aerosolsin the BRAZIL-SR radiative transfer model". In: EGS-AGU-EUG Joint Assembly. 2003.

50. COSTA, R. S.; MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. "Aerossóis atmosféricos e a quantificação do recurso energético solar: experimentos em modelo de transferência radiativa". Revista Brasileira de Energia Solar, v. 3, n. 1, p. 62, 2012.

51. NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponível em <http://www.noaa.gov/>. Acesso em abril 2017.

52. ISO 9060. "Solar energy - Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation", 1990

53. McARTHUR, L. J. B. "World Climate Research Programme - Baseline Surface Radiation Network (BSRN)" - Operations Manual Version 2.1, 2005

54. WEBER, R. L.; BUCKNER, M.; WEBER, J. "Statistical Performance of several mesoscale atmospheric dispersion models". Journal of Applied Meteorology, NOAA Central Library, Department of Commerce, v. 21, n. 11, 1633-1644, 1982.

55. HEINEMANN, A. B.; VAN OORT, P. A. J.; FERNANDES, D. S.; MAIA, A. H. N. "Sensivity of APSIM/ORYZA model due to estimation errors in solar radiation". Bragantia, v. 71, n. 4, p. 572-582, 2012.

56. DEVORE, J. L. "Probabilidade e estatística para engenharia e ciência". São Paulo: Thomson Pioneira, p. 706, 2006.

57. TONIN, F. S. "Caracterização de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica na Cidade de Curitiba". Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia - PPGSE, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, 2017.

58. MANN, H. B. "Non-parametric tests against trend". Econometrica, 1945, 245-259.

59. KENDALL, M. G. "Rank correlation methods". 4 ed. London, 1948: Charles Griffin.

60. IPCC – Intergovernmental Panel in Climate Change. "Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability", 2014. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by C. B. Field et al. Cambridge/New York, Cambridge University Press/ IPCC.

61. ŠÚRI, M.; HULD, T. A.; DUNLOP, E. D.; OSSENBRINK, H. A. “Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries”, Solar Energy, 81, 1295–1305, 2007, Disponível em <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>. Acesso em março 2017.

62. HULD, T.; MÜLLER, R.; GAMBARDELLA, A. “A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa”, Solar Energy, 86, 1803-1815, 2012a.

63. HULD, T.; PASCUA, I. P. “Photovoltaic Solar Electricity Potential in European Countries”, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport, Renewable Energy Unit, 2012b.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.
Percentual de participação na geração de energia elétrica no Brasil por tipo de fonte e detalhamento das renováveis não-hidro 10

Figura 2.
Percentual de participação na geração de energia elétrica das fontes renováveis e não renováveis no Brasil e Global 10

Figura 3.
Série histórica e projeção da demanda de energia elétrica no Brasil no horizonte 2050 10

Figura 4.
Série histórica das perdas no SIN e projeção no horizonte 2050 11

Figura 5.
Representação das componentes da Radiação Solar 13

Figura 6.
Configuração básica de um SFVCR tradicional 13

Figura 7.
SFVCR instalado no Escritório Verde da UTFPR - Campus Curitiba 15

Figura 8.
SFVCR instalado na empresa Elco Engenharia 16

Figura 9.
Evolução da Capacidade Instalada em SFVCR no Estado do Paraná 16

Figura 10.
Mapa do Estado do Paraná com os municípios e suas respectivas mesorregiões 18

Figura 11.
Mapa de Relevo do Estado do Paraná 19

Figura 12.
Sistema Elétrico do Estado do Paraná 20

Figura 13.
Fluxograma simplificado de execução do modelo BRASIL-SR 23

Figura 14.
Localização das Estações da Rede SONDA (Azul) e do INMET (Vermelho) 23

Figura 15a.
Comparação, por meio de gráficos de dispersão, entre as estimativas do modelo BRASIL-SR para o total diário de irradiação global horizontal e valores medidos em superfície para as Mesorregiões do Paraná 27

Figura 15b.
Comparação, por meio de gráficos de dispersão, entre as estimativas do modelo BRASIL-SR para o total diário de irradiação global horizontal e valores medidos em superfície para as Mesorregiões do Paraná 28

Figura 16a.
Histogramas de frequência e da probabilidade cumulativa (linha continua em azul), entre as estimativas do modelo BRASIL-SR para o total diário de irradiação global horizontal e valores medidos em superfície para as Mesorregiões do Paraná 29

Figura 16b.
Histogramas de frequência e da probabilidade cumulativa (linha continua em azul), entre as estimativas do modelo BRASIL-SR para o total diário de

irradiação global horizontal e valores medidos em superfície para as Mesorregiões do Paraná 30

Figura 17.
Comparação, através de gráficos de dispersão e histograma, entre as estimativas do modelo BRASIL-SR para o total diário de irradiação direta normal e valores medidos em superfície para o Estado do Paraná 31

Figura 18.
Escala representando os diferentes níveis de irradiação e de produtividade (para o plano inclinado na latitude) com valores diários médios mensais, sazonais e total anual 34

Figura 19.
Forma de apresentação e leitura dos mapas de irradiação e produtividade (no plano inclinado na latitude) 34

Figura 20.
Variabilidade interanual da média diária de irradiação global horizontal ao longo dos anos de 2005 a 2015 para cada uma das mesorregiões do Estado do Paraná em kWh/m².dia 67

Figura 21a.
Variabilidade interanual dos valores médios diários sazonais da irradiação global horizontal ao longo dos anos de 2005 a 2015 para as mesorregiões do Estado do Paraná em kWh/m².dia 69

Figura 21b.
Variabilidade interanual dos valores médios diários sazonais da irradiação global horizontal ao longo dos anos de 2005 a 2015 para as mesorregiões do Estado do Paraná em kWh/m².dia 70

Figura 22a.
Análise de tendência aplicada às médias anuais da irradiação solar global horizontal diária nas mesorregiões do Estado do Paraná 71

Figura 22b.
Análise de tendência aplicada às médias anuais da irradiação solar global horizontal diária nas mesorregiões do Estado do Paraná 72

Figura 23.
Potencial anual médio de energia solar no Estado do Paraná e nas mesorregiões 76

Figura 24.
Mapas de Irradiação e de Produtividade para o Estado do Paraná e para a Europa - Valores Anuais 78

Figura 25.
Mapa com a representação do sistema elétrico e da irradiação no plano inclinado na latitude no Estado do Paraná 81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.
Média anual de irradiação e produtividade por mesorregião, com a identificação dos municípios com as maiores e menores médias 75

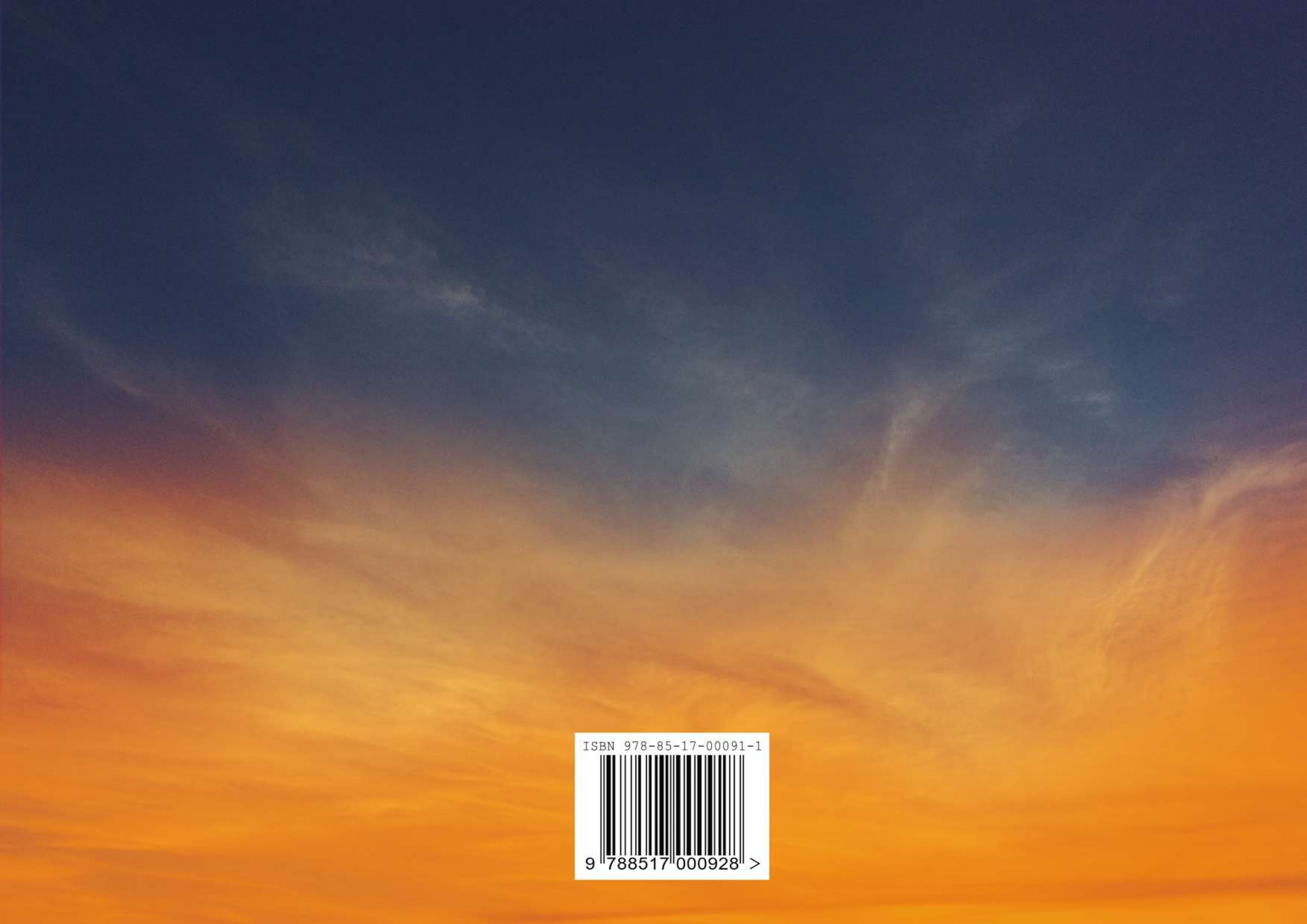
Tabela 2.
Valores de irradiação e de produtividade estimada média anual no plano inclinado na latitude, para uma taxa de desempenho de 75%, encontrados no Paraná e nos países da Europa 79

ANEXO A

1. Curitiba
2. Abatiá
3. Adrianópolis
4. Agudos do Sul
5. Almirante Tamandaré
6. Altamira do Paraná
7. Alto Paraíso
8. Alto Paraná
9. Alto Piquiri
10. Altônia
11. Alvorada do Sul
12. Amaporã
13. Ampére
14. Anahy
15. Andirá
16. Ângulo
17. Antonina
18. Antônio Olinto
19. Apucarana
20. Arapongas
21. Arapoti
22. Arapuã
23. Araruna
24. Araucária
25. Ariranha do Ivaí
26. Assaí
27. Assis Chateaubriand
28. Astorga
29. Atalaia
30. Balsa Nova
31. Bandeirantes
32. Barbosa Ferraz
33. Barra do Jacaré
34. Barracão
35. Bela Vista da Caroba
36. Bela Vista do Paraíso
37. Bituruna
38. Boa Esperança
39. Boa Esperança do Iguaçu
40. Boa Ventura de São Roque
41. Boa Vista da Aparecida
42. Bocaiúva do Sul
43. Bom Jesus do Sul
44. Bom Sucesso
45. Bom Sucesso do Sul
46. Borrazópolis
47. Braganey
48. Brasilândia do Sul
49. Cafeara
50. Cafelândia
51. Cafezal do Sul
52. Califórnia
53. Cambará
54. Cambé
55. Cambira
56. Campina da Lagoa
57. Campina do Simão
58. Campina Grande do Sul
59. Campo Bonito
60. Campo do Tenente
61. Campo Largo
62. Campo Magro
63. Campo Mourão
64. Cândido de Abreu
65. Candói
66. Cantagalo
67. Capanema
68. Capitão Leônidas Marques
69. Carambeí
70. Carlópolis
71. Cascavel
72. Castro
73. Catanduvas
74. Centenário do Sul
75. Cerro Azul
76. Céu Azul
77. Chopinzinho
78. Cianorte
79. Cidade Gaúcha
80. Clevelândia
81. Colombo
82. Colorado
83. Congonhinhas
84. Conselheiro Mairinck
85. Contenda
86. Corbélia
87. Cornélio Procópio
88. Coronel Domingos Soares
89. Coronel Vivida
90. Corumbataí do Sul
91. Cruz Machado
92. Cruzeiro do Iguaçu
93. Cruzeiro do Oeste
94. Cruzeiro do Sul
95. Cruzmaltina
96. Curiúva
97. Diamante d'Oeste
98. Diamante do Norte
99. Diamante do Sul
100. Dois Vizinhos
101. Douradina
102. Doutor Camargo
103. Doutor Ulysses
104. Enéas Marques
105. Engenheiro Beltrão
106. Entre Rios do Oeste
107. Esperança Nova
108. Espigão Alto do Iguaçu
109. Farol
110. Faxinal
111. Fazenda Rio Grande
112. Fênix
113. Fernandes Pinheiro
114. Figueira
115. Flor da Serra do Sul
116. Floraí
117. Floresta
118. Florestópolis
119. Flórida
120. Formosa do Oeste
121. Foz do Iguaçu
122. Foz do Jordão
123. Francisco Alves
124. Francisco Beltrão

125. General Carneiro
126. Godoy Moreira
127. Goioerê
128. Goioxim
129. Grandes Rios
130. Guaíra
131. Guairaçá
132. Guamiranga
133. Guapirama
134. Guaporema
135. Guaraci
136. Guaraniaçu
137. Guarapuava
138. Guaraqueçaba
139. Guaratuba
140. Honório Serpa
141. Ibaiti
142. Ibema
143. Ibiporã
144. Icaraíma
145. Iguaraçu
146. Iguatu
147. Imbaú
148. Imbituva
149. Inácio Martins
150. Inajá
151. Indianópolis
152. Ipiranga
153. Iporã
154. Iracema do Oeste
155. Irati
156. Iretama
157. Itaguajé
158. Itaipulândia
159. Itambaracá
160. Itambé
161. Itapejara d'Oeste
162. Itaperuçu
163. Itaúna do Sul
164. Ivaí
165. Ivaiporã
166. Ivaté
167. Ivatuba
168. Jaboti
169. Jacarezinho
170. Jaguapitã
171. Jaguariaíva
172. Jandaia do Sul
173. Janiópolis
174. Japira
175. Japurá
176. Jardim Alegre
177. Jardim Olinda
178. Jataizinho
179. Jesuítas
180. Joaquim Távora
181. Jundiaí do Sul
182. Juranda
183. Jussara
184. Kaloré
185. Lapa
186. Laranjal
187. Laranjeiras do Sul
188. Leópolis
189. Lidianópolis
190. Lindoeste
191. Loanda
192. Lobato
193. Londrina
194. Luiziana
195. Lunardelli
196. Lupionópolis
197. Mallet
198. Mamborê
199. Mandaguaçu
200. Mandaguari
201. Mandirituba
202. Manfrinópolis
203. Mangueirinha
204. Manoel Ribas
205. Marechal Cândido Rondon
206. Maria Helena
207. Marialva
208. Marilândia do Sul
209. Marilena
210. Mariluz
211. Maringá
212. Mariópolis
213. Maripá
214. Marmeleiro
215. Marquinho
216. Marumbi
217. Matelândia
218. Matinhos
219. Mato Rico
220. Mauá da Serra
221. Medianeira
222. Mercedes
223. Mirador
224. Miraselva
225. Missal
226. Moreira Sales
227. Morretes
228. Munhoz de Melo
229. Nossa Senhora das Graças
230. Nova Aliança do Ivaí
231. Nova América da Colina
232. Nova Aurora
233. Nova Cantu
234. Nova Esperança
235. Nova Esperança do Sudoeste
236. Nova Fátima
237. Nova Laranjeiras
238. Nova Londrina
239. Nova Olímpia
240. Nova Prata do Iguaçu
241. Nova Santa Bárbara
242. Nova Santa Rosa
243. Nova Tebas
244. Novo Itacolomi
245. Ortigueira
246. Ourizona
247. Ouro Verde do Oeste
248. Paiçandu
249. Palmas
250. Palmeira
251. Palmital
252. Palotina
253. Paraíso do Norte
254. Paranacity
255. Paranaguá
256. Paranapoema
257. Paranavaí
258. Pato Bragado
259. Pato Branco
260. Paula Freitas
261. Paulo Frontin
262. Peabiru
263. Perobal
264. Pérola

265. Pérola d'Oeste
266. Piên
267. Pinhais
268. Pinhal de São Bento
269. Pinhalão
270. Pinhão
271. Piraí do Sul
272. Piraquara
273. Pitanga
274. Pitangueiras
275. Planaltina do Paraná
276. Planalto
277. Ponta Grossa
278. Pontal do Paraná
279. Porecatu
280. Porto Amazonas
281. Porto Barreiro
282. Porto Rico
283. Porto Vitória
284. Prado Ferreira
285. Pranchita
286. Presidente Castelo Branco
287. Primeiro de Maio
288. Prudentópolis
289. Quarto Centenário
290. Quatiguá
291. Quatro Barras
292. Quatro Pontes
293. Quedas do Iguaçu
294. Querência do Norte
295. Quinta do Sol
296. Quitandinha
297. Ramilândia
298. Rancho Alegre
299. Rancho Alegre d'Oeste
300. Realeza
301. Rebouças
302. Renascença
303. Reserva
304. Reserva do Iguaçu
305. Ribeirão Claro
306. Ribeirão do Pinhal
307. Rio Azul
308. Rio Bom
309. Rio Bonito do Iguaçu
310. Rio Branco do Ivaí
311. Rio Branco do Sul
312. Rio Negro
313. Rolândia
314. Roncador
315. Rondon
316. Rosário do Ivaí
317. Sabáudia
318. Salgado Filho
319. Salto do Itararé
320. Salto do Lontra
321. Santa Amélia
322. Santa Cecília do Pavão
323. Santa Cruz de Monte Castelo
324. Santa Fé
325. Santa Helena
326. Santa Inês
327. Santa Isabel do Ivaí
328. Santa Izabel do Oeste
329. Santa Lúcia
330. Santa Maria do Oeste
331. Santa Mariana
332. Santa Mônica
333. Santa Tereza do Oeste
334. Santa Terezinha de Itaipu
335. Santana do Itararé
336. Santo Antônio da Platina
337. Santo Antônio do Caiuá
338. Santo Antônio do Paraíso
339. Santo Antônio do Sudoeste
340. Santo Inácio
341. São Carlos do Ivaí
342. São Jerônimo da Serra
343. São João
344. São João do Caiuá
345. São João do Ivaí
346. São João do Triunfo
347. São Jorge d'Oeste
348. São Jorge do Ivaí
349. São Jorge do Patrocínio
350. São José da Boa Vista
351. São José das Palmeiras
352. São José dos Pinhais
353. São Manoel do Paraná
354. São Mateus do Sul
355. São Miguel do Iguaçu
356. São Pedro do Iguaçu
357. São Pedro do Ivaí
358. São Pedro do Paraná
359. São Sebastião da Amoreira
360. São Tomé
361. Sapopema
362. Sarandi
363. Saudade do Iguaçu
364. Sengés
365. Serranópolis do Iguaçu
366. Sertaneja
367. Sertanópolis
368. Siqueira Campos
369. Sulina
370. Tamarana
371. Tamboara
372. Tapejara
373. Tapira
374. Teixeira Soares
375. Telêmaco Borba
376. Terra Boa
377. Terra Rica
378. Terra Roxa
379. Tibagi
380. Tijucas do Sul
381. Toledo
382. Tomazina
383. Três Barras do Paraná
384. Tunas do Paraná
385. Tuneiras do Oeste
386. Tupãssi
387. Turvo
388. Ubiratã
389. Umuarama
390. União da Vitória
391. Uniflor
392. Uraí
393. Ventania
394. Vera Cruz do Oeste
395. Verê
396. Virmond
397. Vitorino
398. Wenceslau Braz
399. Xambrê



ISBN 978-85-17-00091-1