

ATLAS SOLAR DO RIO GRANDE DO SUL



Universidade Estadual do Rio Grande do Sul

ISBN 978-85-60231-42-3

ATLAS SOLAR DO RIO GRANDE DO SUL

Realização



Universidade Estadual do Rio Grande do Sul

uergs

PPGAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE



Grupo de Pesquisa em Radiação Solar
e Ciências Atmosféricas

Apoio



Conselho Nacional de Desenvolvimento
Científico e Tecnológico



Equipe técnica

Rafael Haag
coordenador, revisor

Raiana Schirmer Soares
análise e qualificação de dados,
Interpolação e mapas.

Geórgia Andrade Tomaszewski
análise e qualificação
de dados, modelos de radiação
solar.

Claudinéia Brazil
coleta e organização de dados,
validação dos resultados

Fabiano Perin Gasparin
Cenários para a energia solar

Augusto Blauth da Silva
modelos de radiação solar

Colaboradores

Arno Krenzinger

Catalogação da Publicação na Fonte (CIP)

Atlas Solar do Rio Grande do Sul / Rafael Haag; Raiana Schirmer Soares; Geórgia Andrade Tomaszewski; Claudinéia Brazil; Fabiano Perin Gasparin; Augusto Blauth da Silva -

Porto Alegre: UERGS, 2018.

79 p. E-book no formato PDF.

ISBN 978-85-60231-42-3

1. Energia – Rio Grande do Sul 2. Energia Solar- Rio Grande do Sul 3. Radiação Solar 4. Sensoriamento Remoto. I. Haag, Rafael; II. Soares, Raiana Schirmer; III. Tomaszewski, Geórgia Andrade; IV. Brazil, Claudinéia; V. Gasparin, F. P; VI. Silva, Augusto Blauth.

Este trabalho foi elaborado com fontes suportadas pelo projeto GNU FreeFont.
Diagramação e editoração final a partir do pacote LibreOffice e editor de imagens GIMP.
Para a análises estatísticas e gráficos foi empregado o programa R.
Sistema operacional Linux Ubuntu.

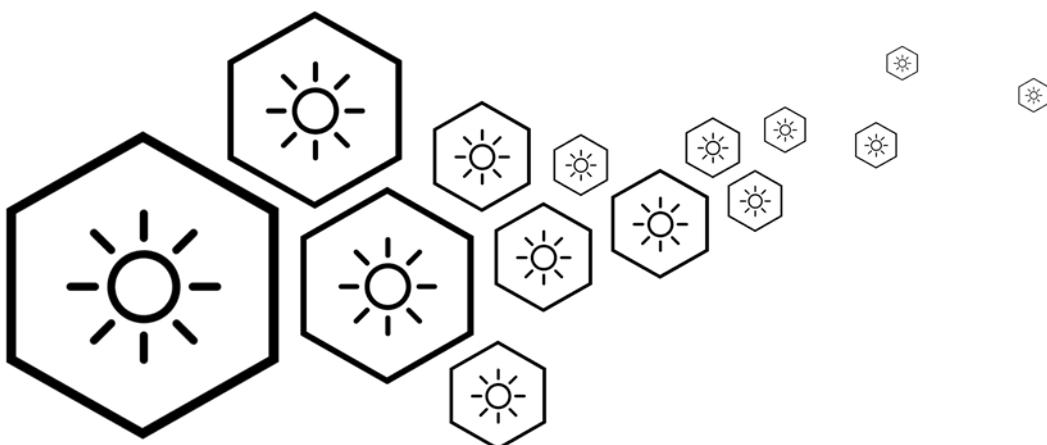


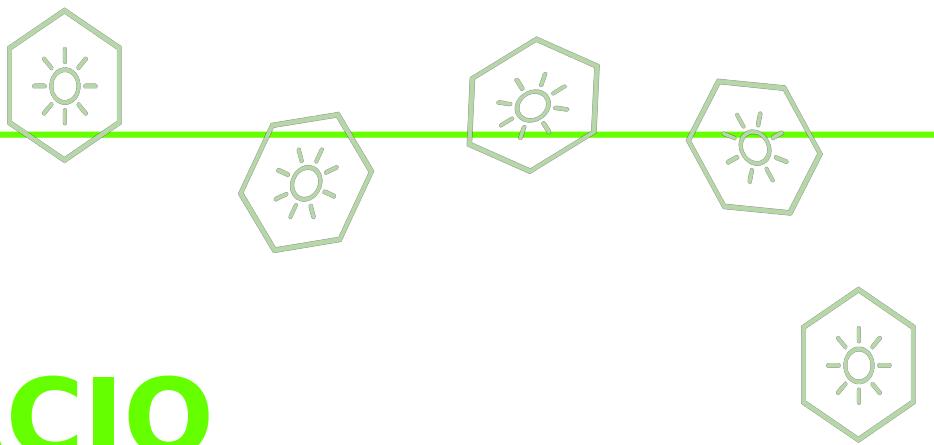
Este trabalho e todos seus dados estão licenciados sob os termos *creative commons*.
São permitidas adaptações a partir do trabalho original para fins não comerciais, desde que atribuam o devido crédito e que as novas criações sejam licenciadas sob termos idênticos.

Porto Alegre – Rio Grande do Sul - Brasil
1ª Edição – novembro de 2018

SUMÁRIO

Prefácio	4
1 Introdução	6
2 Energia Solar no Rio Grande do Sul	11
3 Radiação Solar e Atmosfera Terrestre	17
4 Dados e Sensores Solarimétricos	27
5 Metodologia Empregada	36
6 Mapas Solarimétricos	43
7 Validação dos Resultados	63
Referências	71
Figuras	74
Tabelas	78





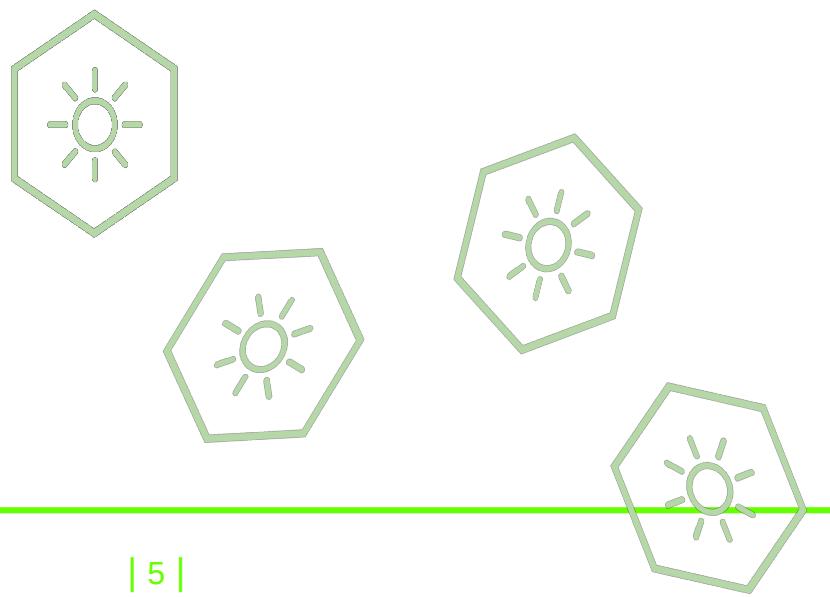
PREFÁCIO

O presente Atlas Solar do Rio Grande do Sul é resultado do trabalho desenvolvido ao longo de aproximadamente 2 anos pelo Grupo de Pesquisa em Radiação Solar e Ciências Atmosféricas da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS) em, dado o compromisso acadêmico com as demandas de desenvolvimento do estado, tornar públicas informações referentes a radiação solar do Rio Grande do Sul.

Cada vez mais, o conhecimento preciso sobre o potencial da energia solar assume uma importância estratégica para a produção de energia limpa e renovável. Nos últimos anos o uso da energia solar fotovoltaica no Brasil tem crescido ao redor de 300% ao ano e o Rio Grande do Sul ocupa a segunda posição nacional em potência fotovoltaica instalada e é o terceiro estado do país em número de instalações de Geração Distribuída (GD). Todos os cenários apresentados atualmente mostram a energia solar como a fonte energética que mais crescerá no mundo até 2050. A energia solar também é fonte de energia que mais demanda empregos qualificados por unidade de energia instalada, assim, trata-se de um recurso renovável com inúmeras vantagens ambientais e sociais.

Este Atlas Solar do Rio Grande do Sul é o primeiro a utilizar exclusivamente dados coletados por estações automáticas e oriundos de piranômetros de primeira classe. Os dados brutos de radiação global horizontal disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) foram cuidadosamente tratados e qualificados. Os mapas de irradiação solar apresentados neste Atlas foram desenvolvidos e validados estatisticamente com uso de várias ferramentas computacionais e comparados com os modelos de reanálises *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) e *The Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2* (MERRA-2). Os resultados também foram confrontados com os previstos pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar.

Diante das mudanças tecnológica e regulatórias, que notoriamente alteraram o curso da energia solar no Brasil e no estado nestes últimos anos, tornando-a uma realidade iminente, os autores esperam que o Atlas Solar do Rio Grande do Sul auxilie no fomento da energia solar no estado, sob a certeza de que a energia inesgotável oriunda do Sol responde às expectativas de um desenvolvimento energético baseado numa fonte limpa e sustentável.





INTRODUÇÃO

O Rio Grande do Sul (Figura 1) é o 9º maior estado do Brasil, com extensão territorial de 281.737,888 km², ocupando mais de 3% do território brasileiro. Dividido em 497 municípios, possui 11,329 milhões de habitantes, conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018), o que corresponde ao 5º estado com a maior população nacional. A densidade demográfica é de 37,96 habitantes/km².

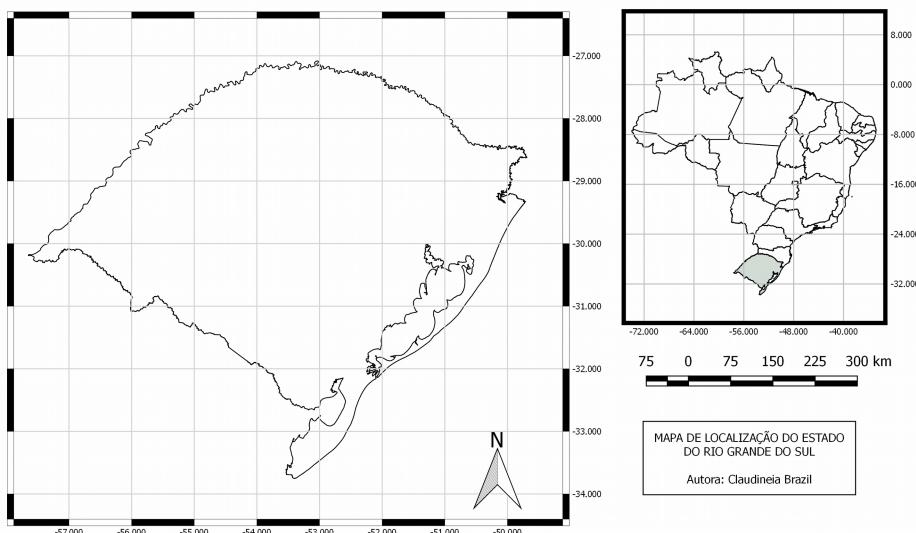


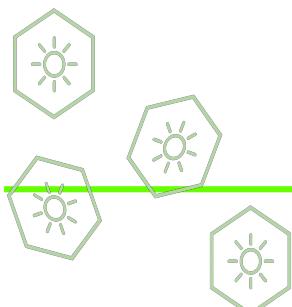
Figura 1. Mapa de localização do Estado do Rio Grande do Sul.

A definição espacial dos elementos climáticos, são influenciados pelos fatores geográficos locais e regionais, de acordo com Rossato (2011) o Rio Grande do Sul apresenta clima subtropical dividido em quatro tipos climáticos principais (Subtropical I - Pouco Úmido; Subtropical II: Medianamente Úmido com a variação longitudinal das temperaturas médias; Subtropical III - Úmido com variação longitudinal das temperaturas médias; Subtropical IV - Muito Úmido). O regime pluviométrico do estado do Rio Grande do Sul, está associada principalmente aos sistemas frontais.

A elaboração de mapas solarimétricos assume uma grande importância para o desenvolvimento de uma região, uma vez que a ausência de informações sobre a radiação solar disponível afeta diferentes áreas, tais como agropecuária, meteorologia, engenharia florestal, recursos hídricos e a utilização da energia solar fotovoltaica e térmica. No que diz respeito à conversão de energia solar, por se tratar de um mercado em recente ascensão, qualquer investimento de médio e longo prazo vai exigir informações precisas e confiáveis acerca do recurso solar disponível, posto que tal informação está diretamente ligada ao tempo de retorno do investimento da empresa ou dos produtores independentes que o fazem. A falta dessas informações pode ser entendida como uma das principais barreiras no estabelecimento de um mercado ligado à geração de energia renovável em países em desenvolvimento. Visto isso, fica clara a importância da elaboração de mapas solares para o desenvolvimento e para a consolidação de um novo cenário energético local, mais preocupado em atender às demandas sociais e o desenvolvimento de uma matriz energética mais plural e limpa.

De modo geral, existem três principais métodos para a elaboração de mapas solarimétricos: a extração de dados oriundos de diferentes estações terrestres, aplicação de imagens de satélites para a estimativa de radiação através de modelos de transferência radiativa e a utilização de dados ambos os métodos (GUARNIERI, et al. 2006).

Na extração, de maneira geral, emprega-se como estimativa a medida realizada pela estação de medição mais próxima. Embora o emprego desta metodologia possa gerar dados confiáveis para aqueles pontos que se encontram próximos às estações de medição, à medida que a distância entre os dois pontos aumenta, aumentam também os erros da estimativa, uma vez que a incidência de radiação depende das propriedades óticas da atmosfera (especialmente a cobertura de nuvens) particulares desses pontos.



Como estas propriedades óticas não são espacialmente uniformes, dois locais podem receber intensidades de radiação diferentes mesmo que a distância entre eles não seja tão elevada. Para grandes distâncias, as diferenças também podem ocorrer por outros fatores que não as condições atmosféricas distintas, como por exemplo, as trajetórias aparentes do Sol no céu e o comprimento do caminho ótico percorrido pela radiação solar na atmosfera, que dependem da latitude e longitude do local. (GUARNIERI, 2006).

A Figura 2 apresenta as incertezas de dados interpolados e os medidos por meio de satélites para a região Sudeste do Brasil (PEREIRA et al, 2017).

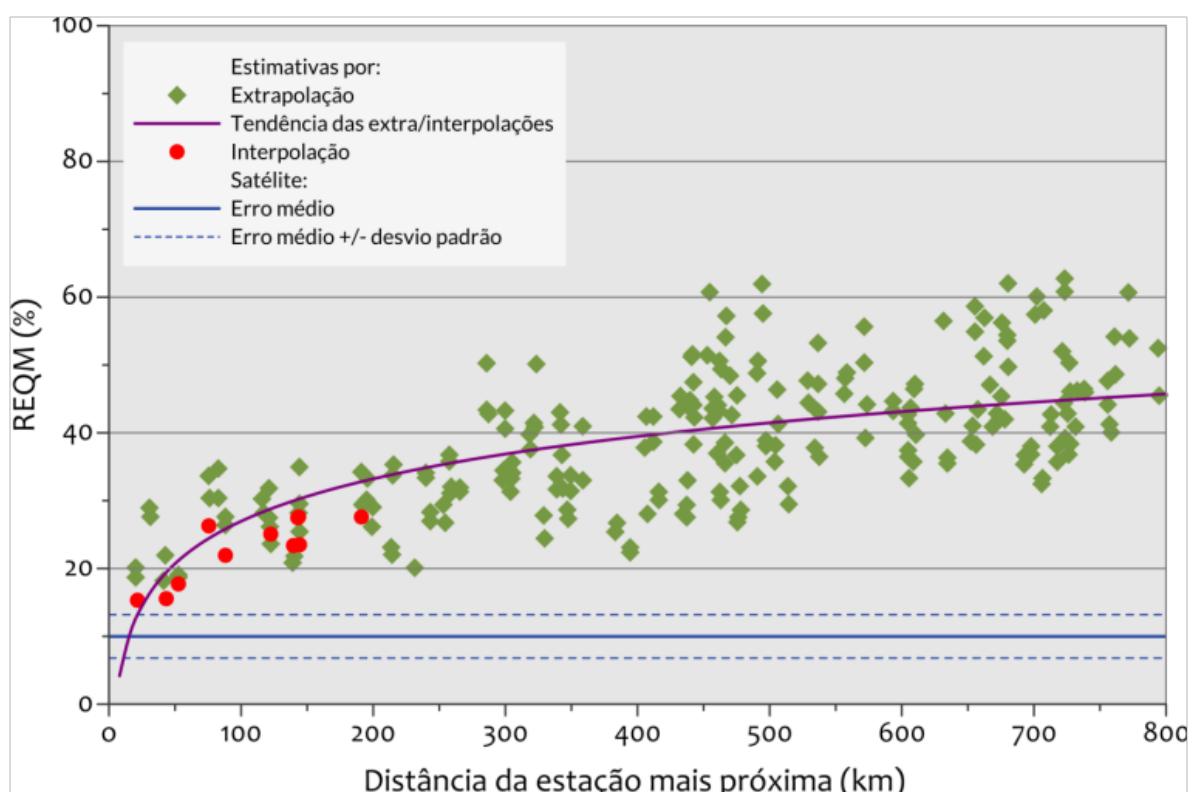
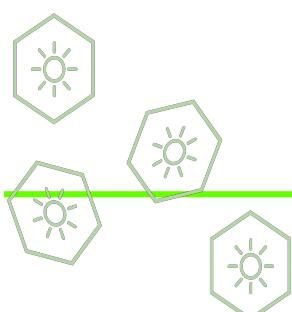


Figura 2. Incerteza nos dados de irradiância solar obtidos através de modelos de transferência radiativa e satélites e os interpolados a partir de medidas em superfície. Fonte: Pereira et al. 2017.



A metodologia de aplicação de imagens de satélites para a estimativa de radiação através de modelos de transferência radiativa, por sua vez, se dá através de imagens provenientes de satélite geoestacionário para posterior processamento. O Atlas Brasileiro de Energia Solar, que adota o modelo de transferência radiativa denominado de BRASIL-SR fez uso de tal metodologia. (PEREIRA et al, 2017).

No Rio Grande do Sul, as primeiras estimativas sobre o potencial solar foram publicadas por Kessler e Corbella em 1979. Neste trabalho, foram apresentados mapas de radiação solar diária total média mensal sobre superfície horizontal para o Rio Grande do Sul para cada um dos 12 meses do ano, utilizando dados de 25 estações meteorológicas do IPAGRO (antigo Instituto de Pesquisas Agronômicas, atualmente FEPAGRO). Os dados utilizados para elaboração destes mapas foram obtidos por actinógrafos e apresentavam inúmeros períodos de dados faltantes. Em geral, a literatura descreve que medidas de radiação solar realizadas por actinógrafos apresentam erros da ordem de 15 a 20% (Tiba, 2000). A Figura 3 mostra como exemplo a estimativa de radiação solar global horizontal média diária no estado do Rio Grande do Sul para o mês de novembro.

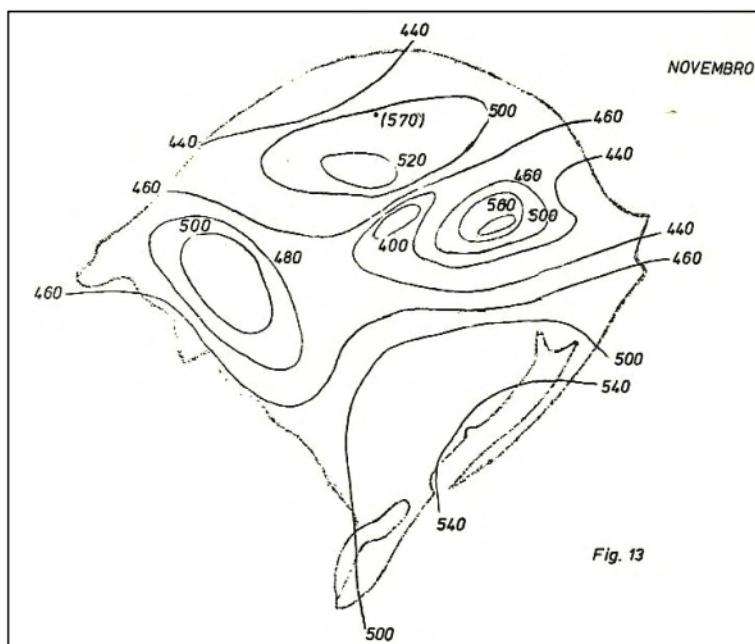
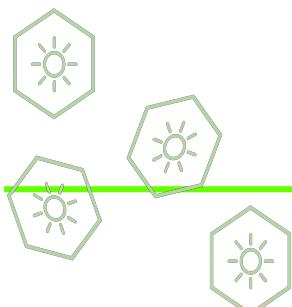


Figura 3. Mapa de isolinhas para a radiação solar no Rio Grande do Sul no mês de novembro. Fonte: adaptado de Kessler e Corbella, 1979.



Em 2004, Martinazzo, coletando dados em 24 estações meteorológicas pertencentes a FEPAGRO e INMET no Rio Grande do Sul apresentou mapas mensais e anuais de iso-radiação global horizontal e insolação para o estado. A base de dados para a elaboração destes mapas foram a combinação de medidas obtidas por actinógrafos e heliógrafos do tipo Campbell-Stokes, que fornecem apenas informações sobre horas de brilho solar em um determinado dia, ou seja, o período em que o disco solar não estava encoberto por nuvens. A Figura 4 mostra o mapa de radiação solar global horizontal média diária para o Rio Grande do Sul.

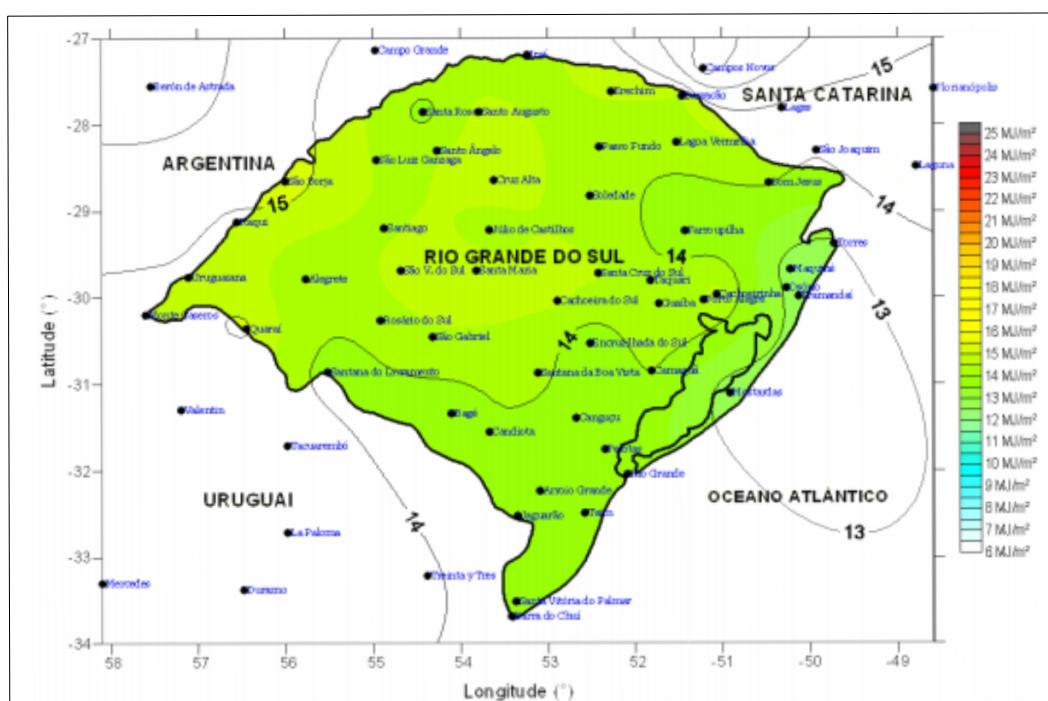
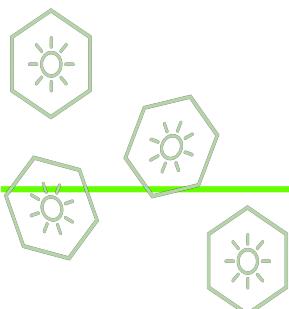
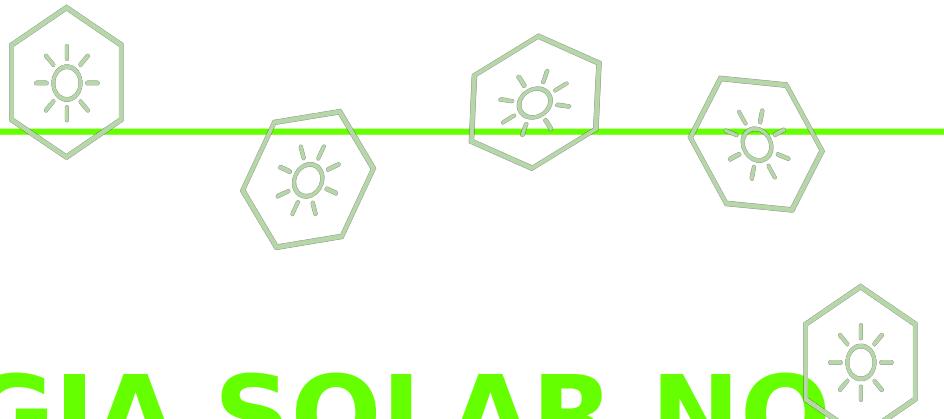


Figura 4. Mapa de radiação solar global horizontal média anual diária para Rio Grande do Sul. Fonte: adaptado de Martinazzo, 2004.





ENERGIA SOLAR NO RIO GRANDE DO SUL

O Rio Grande do Sul tem desempenhado um papel importante para o desenvolvimento da energia solar no país desde os anos 70, quando surgiu o grupo de pesquisa na área de energia solar na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, hoje denominado de LABSOL (Laboratório de Energia Solar) e vinculado à Escola de Engenharia da UFRGS. O LABSOL já formou mais de 60 mestres e doutores na área de energia solar e foi um dos pioneiros na implantação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, tendo instalado uma central fotovoltaica de 4,8 kWp no ano de 2004, mostrada na Figura 5.

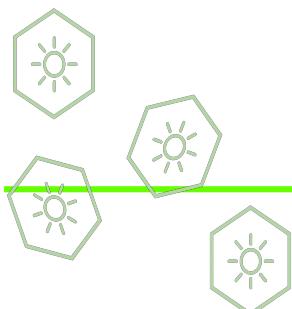


Figura 5. Prédio do Laboratório de Energia Solar, LABSOL, da UFRGS onde podem ser visto os módulos fotovoltaicos que integram o sistema conectado à rede de 4,8 kWp implantado no ano de 2004.
Fonte: LABSOL, UFRGS.

Também em Porto Alegre, na PUC-RS, encontra-se o Núcleo de Tecnologia em Energia Solar (NT-Solar) que em maio de 2004, através de um acordo de cooperação técnico-científica, implantou o Centro Brasileiro para Desenvolvimento da Energia Solar Fotovoltaica (CB-Solar). O CB-Solar pesquisa e desenvolve células e módulos fotovoltaicos em linha pré-industrial, tendo desenvolvido um processo de fabricação de células com alta eficiência (17%).

O primeiro curso de engenharia no Brasil com foco na formação de recursos humanos na área de energias renováveis foi criado no Rio Grande do Sul. A Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, UERGS, em 2001, inaugurou o curso de Engenharia em Energia e Desenvolvimento Sustentável, hoje denominado de Engenharia de Energia.

Desde a publicação da Resolução Normativa 482 da ANEEL, que estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica o sistema de compensação de energia elétrica (ANEEL, 2012), o Rio Grande do Sul vem apresentando papel de destaque no setor. Tal afirmação pode ser constatada através da Figura 6, que ilustra a potência instalada em cada unidade da federação até o final de fevereiro de 2018, posicionando o RS em segundo lugar em relação à potência instalada até a data. Nota-se na Figura 6 que Minas Gerais, Rio Grande do Sul e São Paulo respondem por mais de 50% da potência fotovoltaica instalada no sistema de geração distribuída (GD) no país.



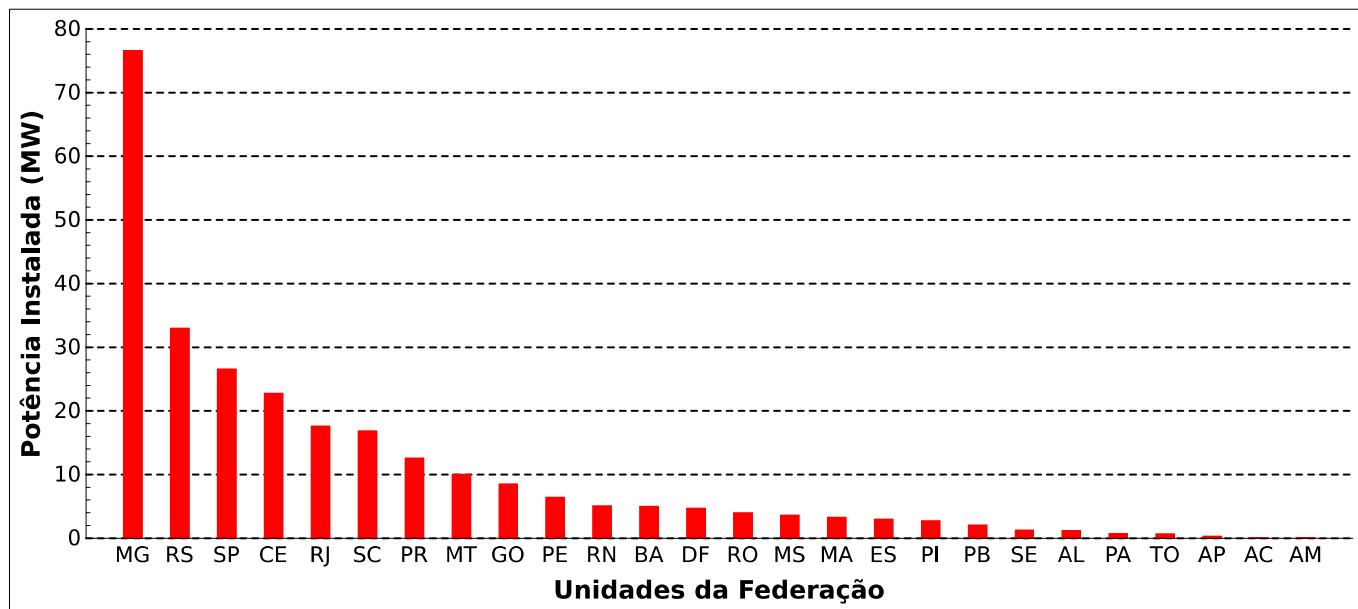
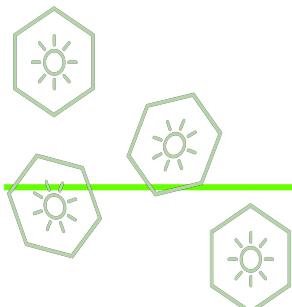


Figura 6. Potência solar fotovoltaica instalada (MW) por Unidade da Federação até fevereiro de 2018. Compilado de ANEEL (2018).

A Figura 7 descreve o crescimento no número de instalações de micro e minigeração distribuída no Rio Grande do Sul desde a vigência da RN 482 da ANEEL. O crescimento médio anual de novas instalações é de 428% para o período 2013-2017. Realizando uma projeção através de um modelo de crescimento logístico, espera-se que no final do ano de 2018 o Rio Grande do Sul supere a marca de 5400 unidades de micro e minigeração distribuída.



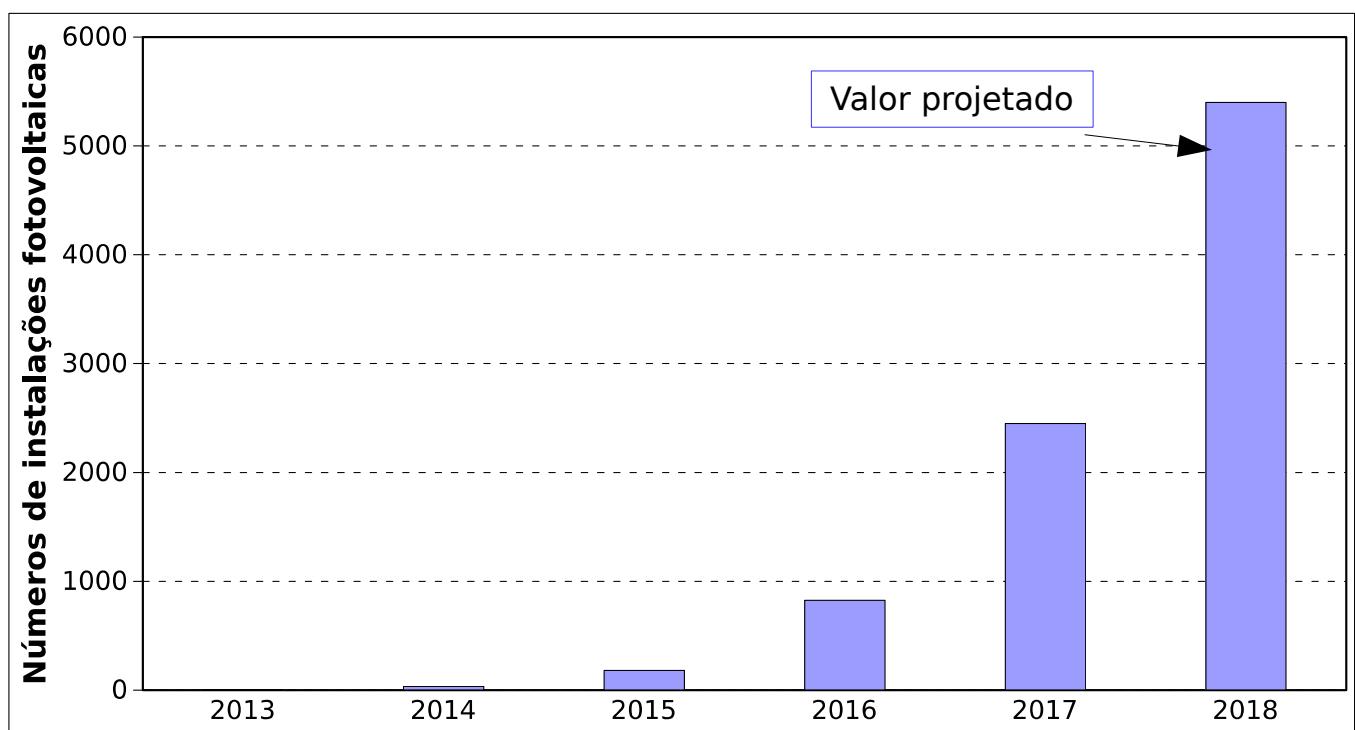
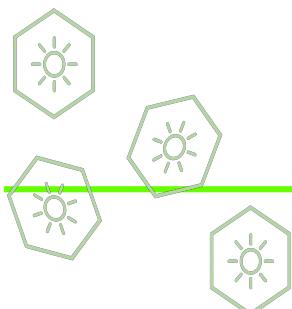


Figura 7. Número acumulado de micro e minigeração distribuída no Rio Grande do Sul desde 2013 segundo o banco de dados da ANEEL em fevereiro de 2018. O valor de 5400 unidades de GD para o final de 2018 é projeção com base na curva de crescimento nos últimos 4 anos. Compilado de ANEEL (2018).

Analizando a localização das instalações dos sistemas de GD fotovoltaicos no Rio Grande do Sul através da Figura 8, nota-se uma concentração de instalações próximo da região metropolitana de Porto Alegre. A cidade de Santa Cruz do Sul possui a maior quantidade de instalações fotovoltaicas do estado (219 unidades cadastradas em fevereiro de 2018). Porto Alegre apresenta 132 instalações registradas no banco de dados da ANEEL.

Na Figura 9 é mostrada a distribuição da potência instalada por município no Rio Grande do Sul. Este mapa foi desenvolvido a partir dos dados contidos nos registros de instalações de sistemas de geração distribuída da ANEEL até agosto de 2017. Nota-se que novamente o município de Santa Cruz do Sul apresenta a maior potência instalada em energia fotovoltaica no estado



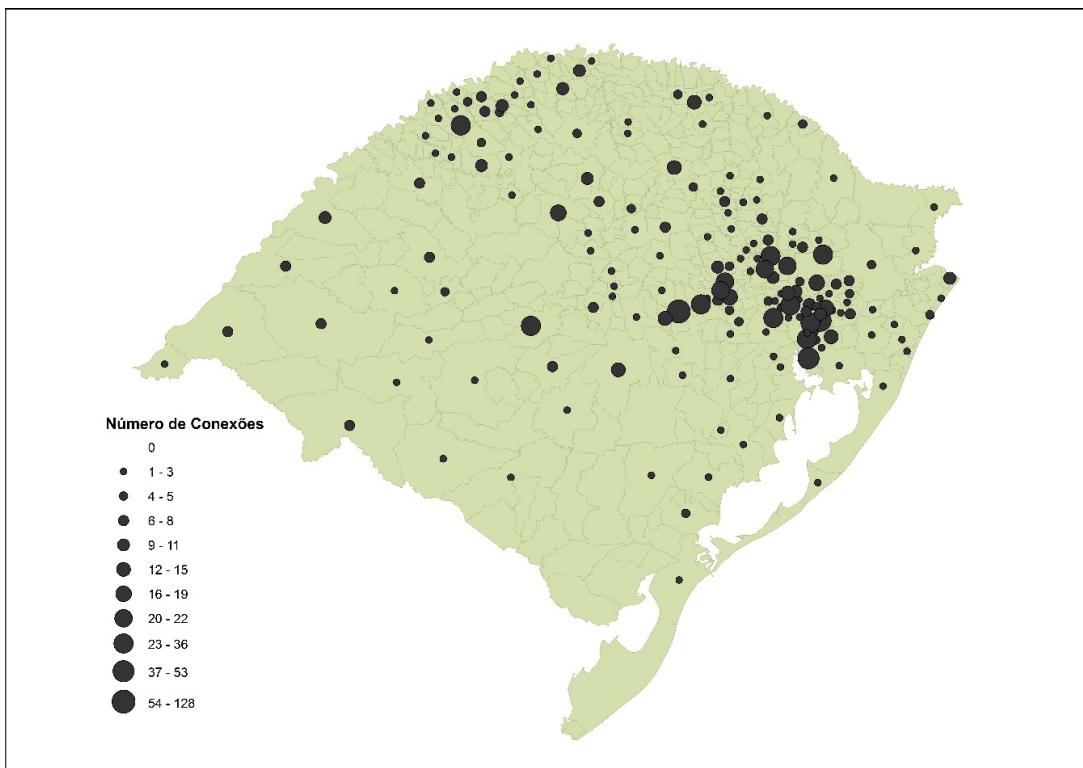


Figura 8. Número de conexões de micro e minigeração distribuída nos municípios do Rio Grande do Sul registradas na ANEEL até agosto de 2017. Compilado de ANEEL (2018).

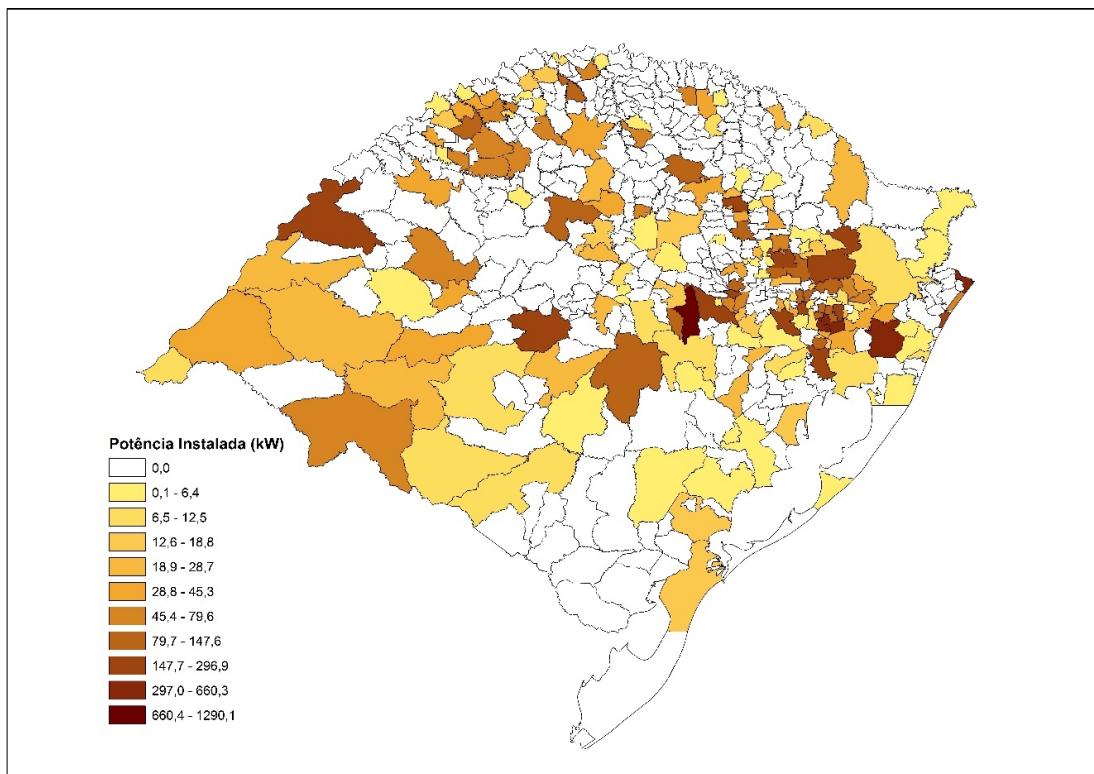
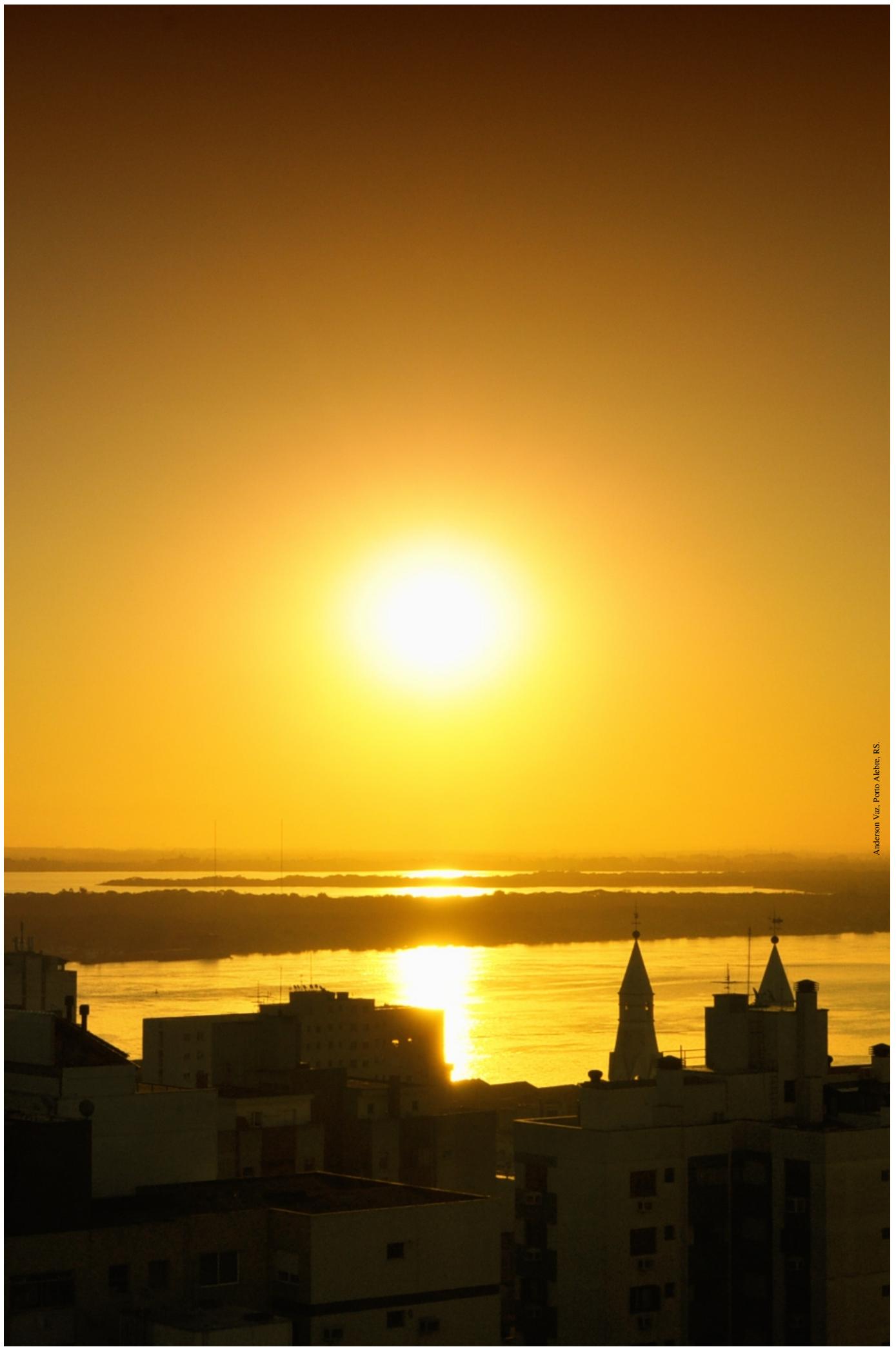
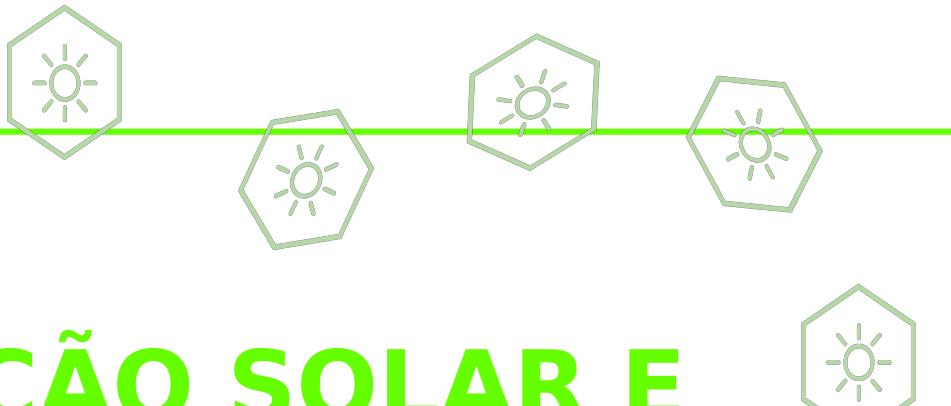


Figura 9. Potência instalada por município em micro e minigeração distribuída no estado do Rio Grande do Sul. Compilado de ANEEL (2018).



Anderson Vaz, Ponto Ache, RS.



RADIAÇÃO SOLAR E ATMOSFERA TERRESTRE

A energia proveniente do Sol constitui-se de uma fonte energética inesgotável, possuindo grandes potenciais de exploração, tanto para fins térmicos como elétricos. Por ser uma fonte de energia relativamente limpa e de longa duração, torna-se uma alternativa atraente para diminuir a dependência do setor energético dos combustíveis fósseis. Conhecer o potencial da radiação solar, bem como, estudar e avaliar dados de irradiações em localidades específicas não é relevante apenas quando se interessa na conversão ou captação dessa fonte. Estudar a radiação solar é, também, de extrema relevância em áreas como: agricultura, hidrologia, astronomia, climatologia, entre outras.

São de grande importância, dentro da radiação solar, a definição dos termos irradiância e irradiação. A irradiância é a taxa de energia radiante que incide sobre uma superfície, por unidade de área da superfície. A irradiação é a energia incidente por unidade de área sobre uma superfície, ela pode ser encontrada matematicamente a partir da integração da irradiância sobre um tempo especificado, normalmente, hora ou dia. As unidades de irradiância e irradiação são W/m^2 e J/m^2 , respectivamente (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

Devido à distância e a relação espacial entre o Sol e a Terra, a radiação solar que chega a uma superfície, fora da atmosfera terrestre, perpendicular aos raios solares, é quase fixa, sendo denominada de constante solar. O valor da constante solar adotado atualmente é 1361 W/m^2 , porém, vale ressaltar que este é um valor médio, pois a emissão da radiação solar não é constante com o passar do tempo. O termo “constante solar”, depois de poucas décadas de monitoramento através de satélites, foi colocado em dúvida, pois a emissão solar eletromagnética possui variações ao longo do tempo.

Atualmente, esse termo é mais bem definido por irradiância solar extraterrestre total, abreviada na literatura por TSI - do inglês “*Total Solar Irradiance*”. Na Figura 10 é possível visualizar a variação da TSI durante o período de 2000 até 2016 obtida através de medidas na superfície terrestre e por sensores a bordo de satélites. Variações da TSI estão relacionadas com a atividade solar que ocorre em ciclos médios de 11 anos.

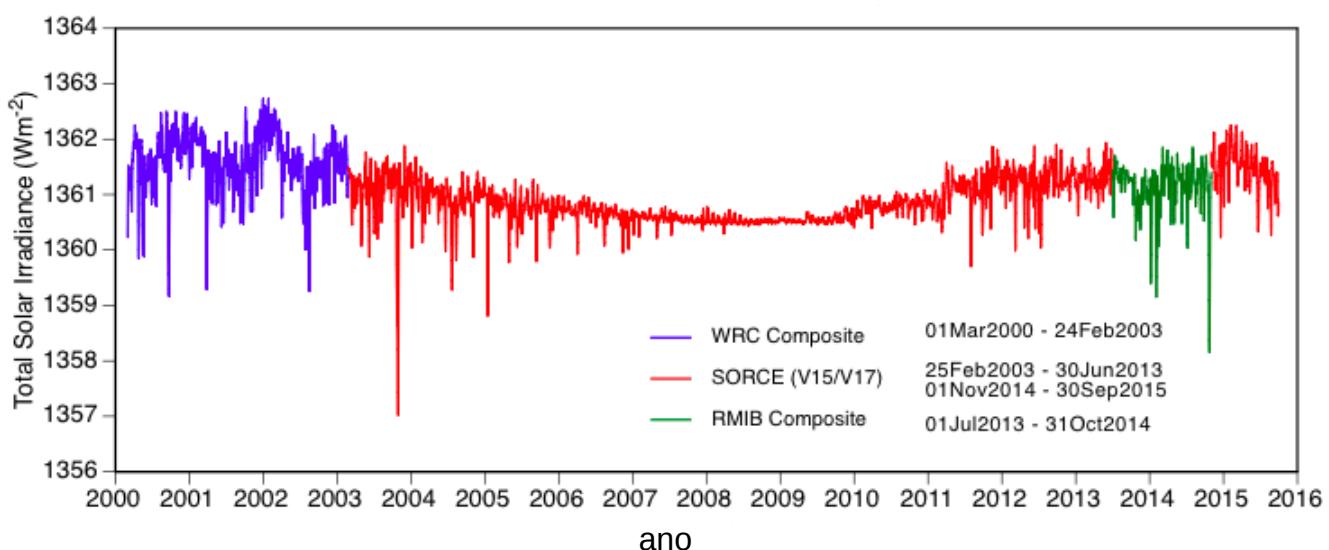


Figura 10. Valores da Irradiância Solar Total (TSI) entre 2000 e 2016.
Compilado de NASA: <https://ceres.larc.nasa.gov>.

A variação da radiação solar incidente no topo da atmosfera terrestre ao longo do ano, em razão da excentricidade da órbita da Terra é indicada pela equação abaixo e visualizada na Figura 11,

$$G_{on} = G_{sc} \cdot \left(1 + 0,033 \cdot \cos \left(\frac{360 \cdot n}{365} \right) \right)$$

onde G_{on} é a radiação extraterrestre com incidência normal, n corresponde ao dia do ano (1 até 365) e G_{sc} é a constante solar. Para fins de engenharia, a energia emitida pelo Sol é considerada fixa, não levando em consideração a ocorrência de manchas solares que podem alterar a intensidade da radiação solar.

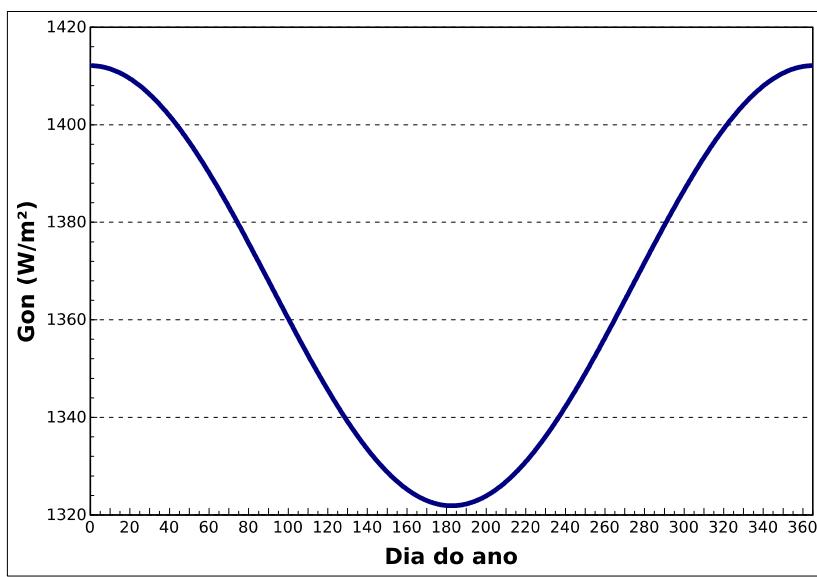


Figura 11. Variação da radiação solar com incidência normal no topo da atmosfera terrestre ao longo do ano.

A Terra, assim como os demais planetas do sistema solar, executa um deslocamento em torno do Sol de forma elíptica. Este deslocamento, denominado de translação, aliado à inclinação de 23,45 graus do eixo axial de rotação da Terra em relação ao plano orbital em torno do Sol, dá origem às estações do ano e determina a duração do dia e a taxa de incidência da energia solar no topo da atmosfera terrestre (Figura 12).

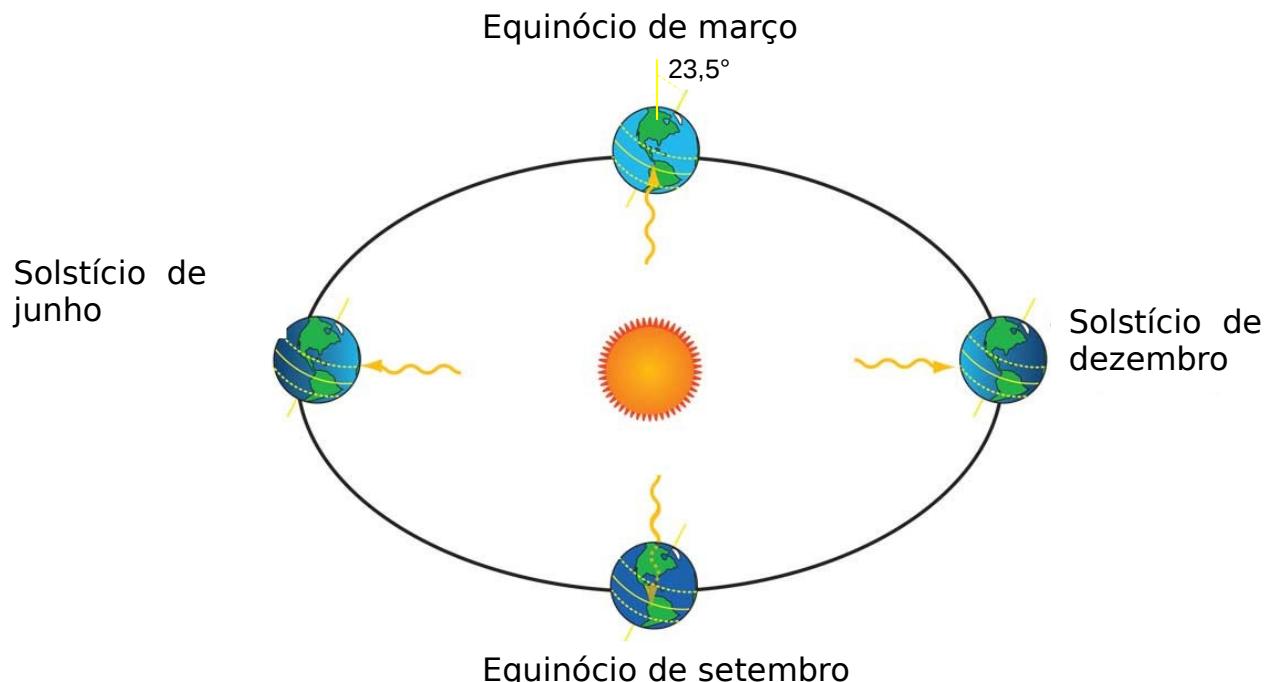


Figura 12. Estações do ano para o hemisfério Sul em função da inclinação do eixo de rotação e translação terrestre.

A Figura 13 mostra a variação do posicionamento do Sol para um observador na latitude -30 graus nas diferentes estações do ano e ao meio dia solar (maior ângulo de elevação do Sol). No início do inverno (21 de junho) temos a menor duração do dia e o maior comprimento da sombra do observador. Nos dias que marcam o início dos equinócios de outono e primavera (21 de março e 22 de setembro, respectivamente), o Sol nasce exatamente no Leste e põem-se no Oeste seguindo a linha azul que indica o equador celeste. Nestas datas o dia possui a mesma duração para qualquer localidade do planeta (12 horas). No solstício de verão (21 de dezembro) o Sol apresenta o maior de elevação angular e menor sombra projetada ao meio dia solar.

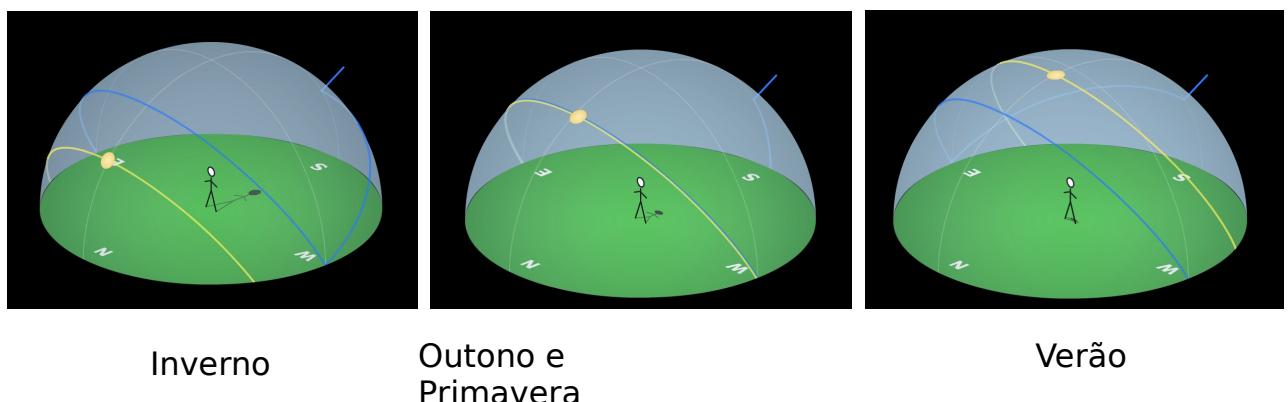


Figura 13. Variação do posicionamento do Sol para na esfera celeste ao longo do ano para a latitude - 30 graus.. Temos a posição do Sol no meio dia solar no primeiro dia de inverno (21 de junho), outono e primavera (21 de março e 22 de setembro, respectivamente) e verão (21 de dezembro).

A variação da duração do dia ao longo de um ano numa determinada localidade não depende apenas da estação do ano. A latitude local é outro importante fator que influencia o fotoperíodo (comprimento do dia). Para localidades situadas na linha do Equador, os dias e as noites apresentam durações similares ao longo de todo o ano, mas os dias sempre são um pouco mais longos que as noites. Isto ocorre mesmo nos equinócios. A explicação para este efeito reside no fato de definirmos o nascer do Sol no momento em que o disco solar torna-se visível acima do horizonte (não o centro do Sol). A definição de por do Sol para cômputo do dia é parecida. Define-se ocaso do Sol quando todo o disco solar encontra-se abaixo da linha do horizonte. Também existe o efeito de refração atmosférica, que possibilita que o disco solar seja visível mesmo quando este já se encontra abaixo da linha do horizonte. Assim, devemos somar estes dois efeitos que ao longo do ano representam um acréscimo entre 6 a 8 minutos na duração dia na linha do Equador.

À medida que nos afastamos do Equador, as estações ficam mais acentuadas e a variação do fotoperíodo aumenta. A diferenciação entre elas torna-se máxima nos polos. O estado do Rio Grande do Sul está compreendido entre as latitudes 27 e 33 graus, tendo os dias uma duração aproximada entre 10 até 14 horas. A Figura 14 mostra os valores do fotoperíodo para localidades situadas na linha do Equador e nas latitudes 27°, 30° e 33° no hemisfério Sul.

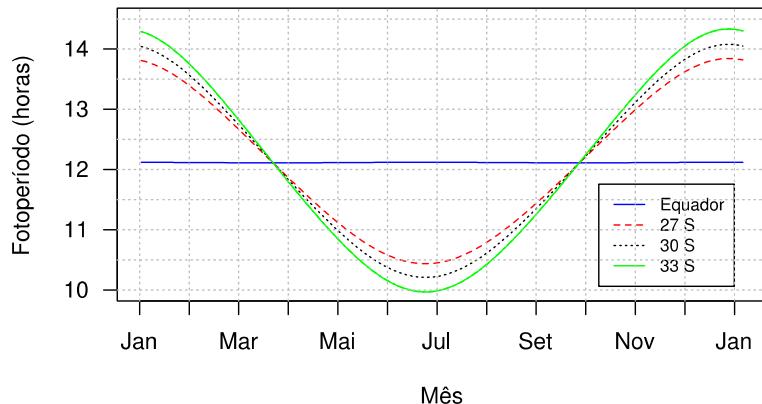


Figura 14. Valores do fotoperíodo ao longo do ano para localidades na linha do Equador e latitudes 27°, 30° e 33° no hemisfério Sul.

Como relatado, os fatores astronômicos relacionados com a geometria do sistema Sol-Terra que afetam a intensidade da radiação solar que incide no topo da atmosfera. No entanto, existem vários outros processos físicos que alteram a intensidade da radiação solar após esta entrar na atmosfera terrestre.

Derivada das palavras gregas: ἀτμός (vapor, ar) e σφαῖρα (esfera), a palavra atmosfera é utilizada para descrever uma fina camada, composta basicamente por gases e poeira, que envolve a Terra. A atmosfera terrestre comporta-se como uma cortina protetora contra a ação da radiação extraterrestre nociva que atinge nosso planeta e também como um regulador térmico ao redor da Terra, protegendo-a e proporcionando condições necessárias para a vida animal e vegetal. Observada do espaço, a Terra aparece como uma esfera de coloração azul brilhante. Esse efeito cromático é provocado principalmente pela dispersão da luz solar sobre a atmosfera do nosso planeta (Figura 15).

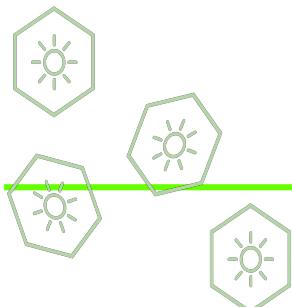




Figura 15. Imagem obtida pela Estação Espacial Internacional revela a pequena espessura da atmosfera terrestre. Fonte: Nasa (2018).

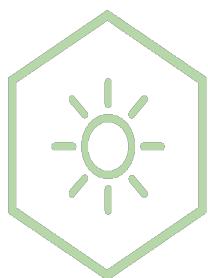
A atmosfera terrestre é composta principalmente por uma mistura de gases e representa apenas 0,0001% da massa total da Terra. Esta tênue e delicada camada é constituída por diversos componentes. O nitrogênio diatômico (N_2) representa 78% do volume total da atmosfera. Este gás atua como suporte aos demais componentes, e é de vital importância para os seres vivos sendo fixado no solo pela ação de bactérias e outros micro-organismos e absorvido pelas plantas, na forma de proteínas vegetais. O oxigênio diatômico (O_2) participa com 21% da composição atmosférica e possui uma estrutura molecular que varia conforme a altitude, sendo responsável pelos processos respiratórios dos seres vivos e combustões. Os demais constituintes atmosféricos são; argônio (Ar) 0,93% da atmosfera terrestre; dióxido de carbono (CO_2) possui uma concentração variável de cerca de 0,035%; hélio (He) 0,0018%; ozônio(O_3) 0,00006%; hidrogênio (H_2) 0,00005%; além de outros elementos com menor concentração como criptônio (Kr), metano (CH_4), xenônio (Xe) e radônio (Rn). A água encontra-se presente na atmosfera em três estados - sólido, líquido e gasoso -, atuando em uma grande variedade de fenômenos como chuva, formação de nuvens, neve entre outros.



Geralmente, a composição atmosférica é analisada considerando-se três grupos distintos de componentes, sendo eles: as moléculas do ar seco, o vapor de água e os aerossóis. Cada um destes grupos atenuam a radiação solar de forma distinta e em comprimentos de onda característicos, justificando esta classificação.

As principais moléculas do ar seco (nitrogênio, oxigênio e argônio) apresentam uma variabilidade relativamente baixa na sua concentração até uma altitude de aproximadamente 100 km. Outros gases, no entanto, não se distribuem de forma homogênea no tempo e no espaço. Estas variações são provocadas principalmente pela atividade industrial e rural local, do meio ambiente e pela dinâmica da atmosfera.

Aerossóis representam o conjunto de partículas sólidas ou líquidas em suspensão na atmosfera. O termo aerossol abrange tanto as partículas quanto o gás no qual elas encontram-se imersas, no caso da atmosfera este meio é o ar. Os aerossóis atmosféricos possuem uma enorme variedade de volumes, formas e dimensões, possuindo tamanhos que, em geral, variam de cerca de 0,01 a 10 μm de diâmetro. Podem ser de origem natural como da ação erosiva dos ventos sobre o solo e a superfície oceânica, ou da conversão gás-partícula ocorrida entre moléculas numa reação química. Podem ter também origem antropogênica como da emissão de particulados da combustão de combustível fóssil. As características dos aerossóis atmosféricos dependem de sua origem e idade. Em geral eles podem viajar por grandes distâncias transportados pelas correntes de ventos. Os aerossóis podem ser classificados em troposféricos e estratosféricos. Os troposféricos são divididos entre continental e marinho. Os aerossóis marinhos representam o maior montante de aerossóis na atmosfera. Os aerossóis continentais podem ser subdivididos entre rural e urbano. Os aerossóis urbanos possuem características dadas pela atividade antropogênica nos grandes centros populacionais, já os aerossóis rurais têm partículas originadas a partir da atividade orgânica vegetal ou mesmo da queima de biomassa.



Na troposfera as partículas de aerossóis apresentam vida média curta, normalmente da ordem de dias e semanas, e portanto sua distribuição espacial é altamente não-homogênea, sendo correlacionada com suas fontes de emissão. Os aerossóis têm grande influência no clima, uma vez que eles aumentam a quantidade de radiação refletida para o espaço (efeito albedo), ao mesmo tempo que, como núcleos formadores de gotículas de água, levam à formação de nuvens que ajudam a concentrar a radiação infravermelha na troposfera (efeito estufa). Também há interação entre aerossóis de pequeno diâmetro com a radiação solar na região espectral do visível e infravermelho próximo. O tamanho destas partículas menores apresenta a mesma ordem que o comprimento de onda da radiação incidente, provocando assim o espalhamento da radiação solar. As partículas maiores apresentam um tempo de residência muito baixo na atmosfera, isso faz com que partículas muito grandes (diâmetro $> 15 \mu\text{m}$) apresentem baixas concentrações na atmosfera. Portanto, devido a esses motivos, a interação de partículas muito grandes com a radiação solar é menor quando comparada com as menores. Entretanto, existem alguns casos especiais em que os efeitos de espalhamento da radiação solar devido a estas partículas de aerossóis de grande diâmetro podem ser acentuados. Como exemplo, tem-se a ocorrência das tempestades de poeira e a queima de biomassa. Em alguns casos a redução na irradiação solar pode ser maior que 50%, como ocorreu em Porto Alegre no dia 22 de agosto de 2010. Nesta data, o céu de Porto Alegre apresentava uma grande quantidade de aerossóis gerados nas queimadas no Centro-Oeste do Brasil que foram transportados por correntes de ventos até o Sul do país (Figura 16).



Figura 16. Espessa camada de aerossóis originados nas queimadas do Centro-Oeste e Norte do país sobre a cidade de Porto Alegre no dia 22 de agosto de 2010.

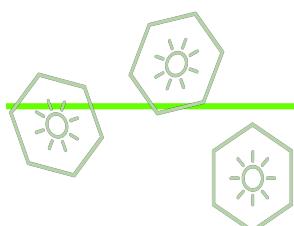
O vapor de água presente na atmosfera é o principal responsável pelo efeito estufa no nosso planeta e um grande absorvedor da radiação solar na faixa do infravermelho. Sem a presença do vapor de água, nosso planeta apresentaria um elevado gradiente térmico entre a face iluminada pelo Sol e a imersa na escuridão noturna. O vapor de água também desempenha um importante papel no ciclo de vida das nuvens e na precipitação.

Diferentemente dos demais gases presentes na atmosfera, o vapor de água pode apresentar uma variação de várias ordens de magnitude em relação a sua distribuição vertical e alterar substancialmente sua concentração em um curto espaço de tempo.

A evaporação dos oceanos, rios e lagos, juntamente com a transpiração da vegetação em grandes florestas, são fontes de vapor de água para a atmosfera. Devido a isto, a concentração na atmosfera deste gás em regiões marítimas e nas florestas tropicais pode ficar próxima de 3%. Por outro lado, nos grandes desertos e em grandes altitudes, a quantidade de vapor de água pode ser tão baixa a ponto de ser imensurável a sua concentração.

Além destes constituintes, as nuvens atuam como importantes moduladoras da radiação solar. As propriedades óticas das nuvens provocam o espalhamento da radiação solar incidente. Estas propriedades estão relacionadas com a espessura da nuvem, distribuição e tamanho das gotículas e cristais de gelo. Em algumas situações, a disposição e tipos de nuvens presentes na atmosfera podem ocasionar um incremento na radiação incidente na superfície terrestre. Este efeito ocorre em função da reflexão da radiação solar nas bordas das nuvens ou efeito de lente (Inman, Chu e Coimbra, 2016).

Nuvens e os demais componentes atmosféricos provocam a atenuação, absorção e espalhamento da radiação solar. Por esta razão, é conveniente decompor a radiação incidente na superfície terrestre em duas componentes específicas: a direta (G_{dir}) e a difusa (G_{dif}). A radiação direta é a radiação recebida do Sol sem ter sofrido interferências atmosféricas, já a radiação difusa é a parcela da radiação solar que é espalhada ou refletida por componentes atmosféricos. A radiação solar global é a soma das parcelas de radiação direta e da radiação difusa que incidem sobre uma superfície. Denomina-se de albedo a razão entre a radiação refletida pela superfície e a radiação incidente sobre ela.



A Figura 17 mostra a irradiância solar antes e após atravessar a atmosfera terrestre e suas componentes.

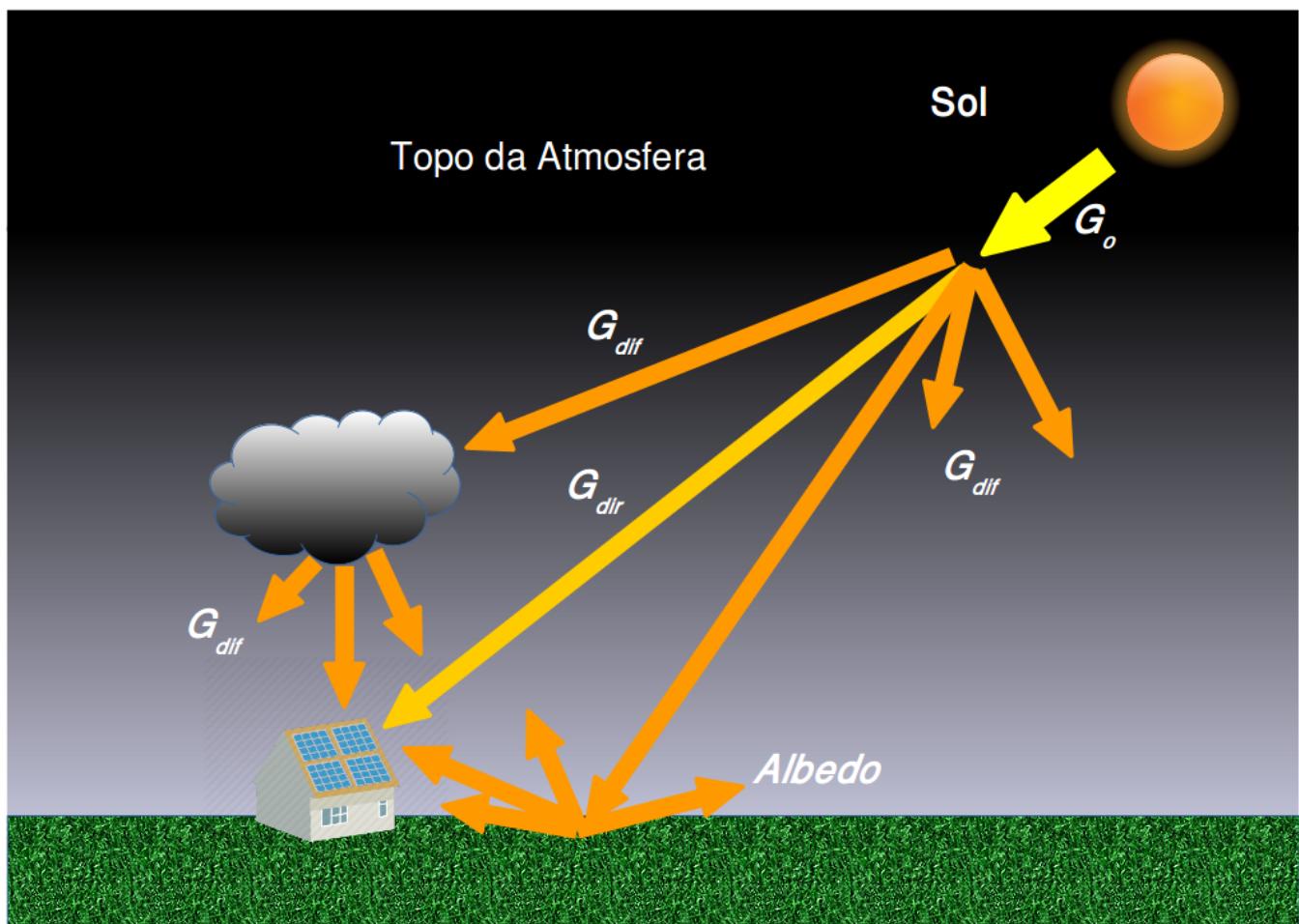
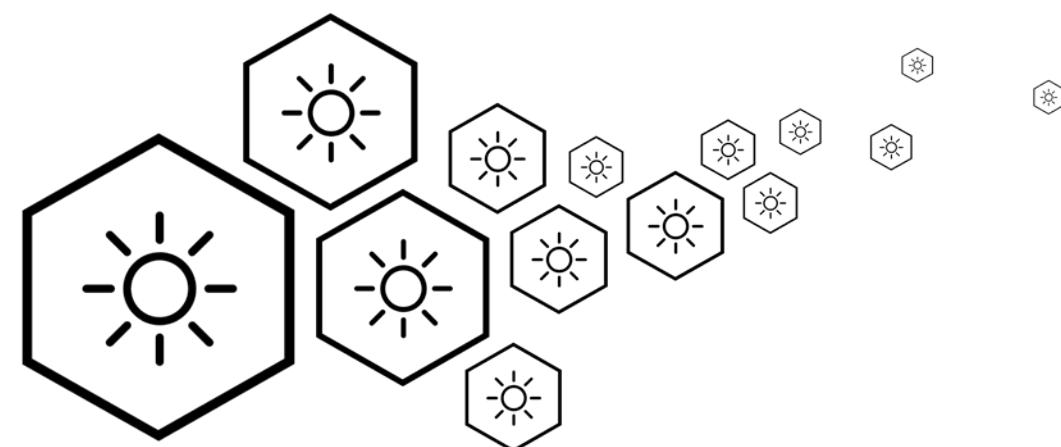


Figura 17. Componentes da irradiância solar antes e após atravessar a atmosfera terrestre.



DADOS E SENSORES SOLARIMÉTRICOS



Os dados sobre irradiação solar em superfície empregados no Atlas Solar do Rio Grande do Sul foram disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e são oriundos de estações meteorológicas automáticas (EMA) dispostas em 38 municípios do estado. A distribuição espacial destas estações automáticas é definida de modo que, preferencialmente, não haja um distanciamento superior a 100 km entre cada estação.

Uma estação meteorológica automática (EMA) coleta, de minuto em minuto, informações sobre uma grande quantidade de variáveis meteorológicas como temperatura, umidade, pressão atmosférica, velocidade e direção de vento, precipitação, radiação solar, entre outras. Na Figura 18 é mostrada uma estação meteorológica automática básica localizada na cidade de Teutônia, RS (Latitude: -29.450334 e Longitude: -51.824283). A Figura 19 apresenta a EMA instalada na cidade de Porto Alegre (Latitude: -30.053536 e Longitude: -51.174766) em conjunto com outros sensores meteorológicos.

A cada hora, os dados das EMA são integralizados e disponibilizados para serem transmitidos, e posteriormente, são validados por um controle de qualidade e armazenados em um banco de dados.

Após esse processo os dados coletados são disponibilizados através de meios eletrônicos podendo ser utilizados para a elaboração de previsão do tempo local ou para diversas aplicações de pesquisa (INMET, 2011). As estações de medição oficiais obedecem normas da Organização Meteorológica Mundial e devem ser instaladas em áreas livres de obstruções naturais ou prediais e segura da interferência humana ou animal.



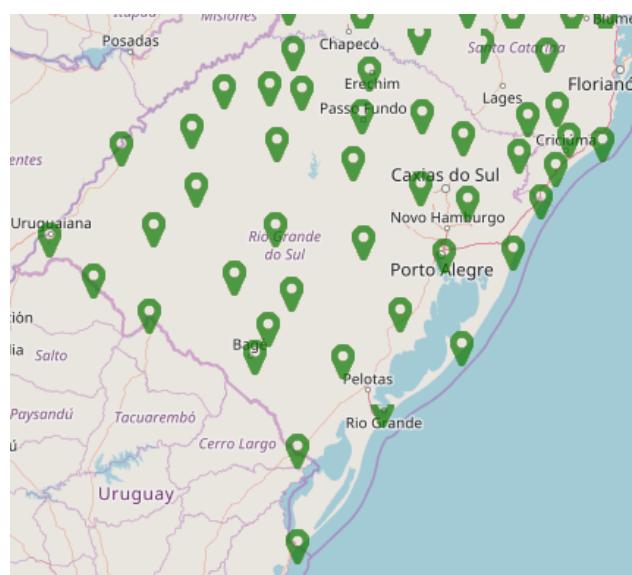
Figura 18. Estação Meteorológica Automática do INMET básica instalada na cidade de Teutônia, RS. Fonte: INMET



Figura 19. Estação Meteorológica Automática do INMET instalada na cidade de Porto Alegre. Fonte: INMET.

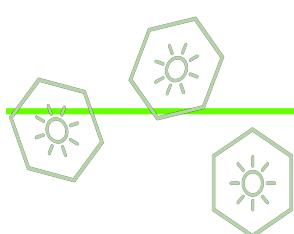
O Instituto Nacional de Meteorologia, possui instalado No Rio Grande do Sul 42 estações automáticas, conforme ilustrado na Figura 20. As primeiras EMAs foram instaladas e tornaram-se operacionais a partir do ano 2000. No entanto, há estações cujo o início da operação é recente, como no caso das EMAs de Cambará do Sul (novembro, 2016), Serafina Corrêa (abril, 2016) e Tupanciretã (agosto, 2016).

Figura 20. Estações Meteorológicas Automáticas do INMET em operação no Rio Grande do Sul. Fonte: INMET.



As EMAs do Instituto Nacional de Meteorologia realizam apenas medidas da componente global horizontal da radiação solar.

Os dados de radiação solar obtidos pelas estações automáticas são oriundos de piranômetros da marca Eppley, model PSP (*Precision Spectral Pyranometer*), visto na Figura 21. Os piranômetros são instalados em suportes metálicos juntamente com os medidores de precipitação (pluviômetro) a aproximadamente 1,5m do solo. Este piranômetro utiliza sensor termoelétrico composto por uma termopilha multi-junção pintada de preto que apresenta uma resposta espectral bastante ampla. O sensor é coberto por duas cúpulas de vidro ambas do tipo Schott WG295. As incertezas nas medições realizadas pelo piranômetro Eppley PSP em medições de longa base temporal são da ordem de 5% (MYERS, 2013).



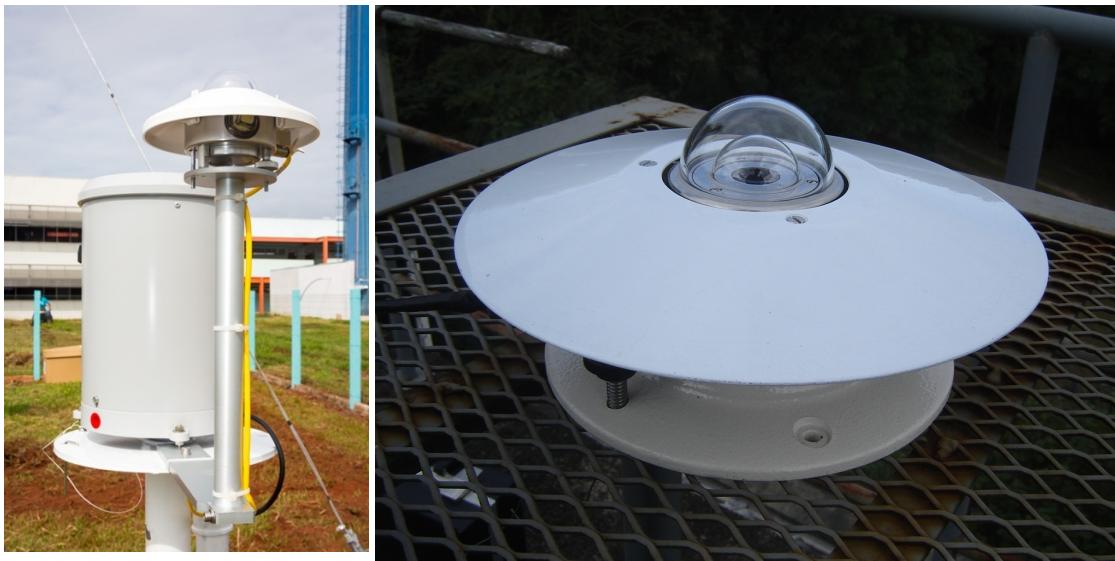
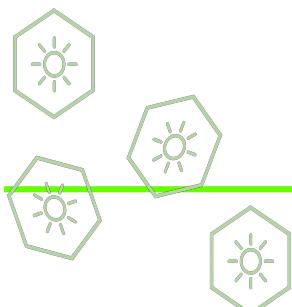


Figura 21. Montagem típica do medidor de radiação solar numa estação meteorológica automática do INMET à esquerda e detalhes do piranômetro Eppley modelo PSP à direita. Fonte: INMET e LABSOL - UFRGS

Os piranômetros de termopilha são classificados segundo a norma ISO 9060, que também é adotado pela Organização Meteorológica Mundial (WMO). Este padrão separa os piranômetros em três classes. Piranômetros na categoria "Padrão Secundário" são utilizados como referência e são calibrados por comparação direta com instrumentos primários e certificados pela WMO. Na sequência encontramos os piranômetros de "Primeira Classe" e por fim os classificados como "Segunda Classe". Estas diferenças nas classes são devidas principalmente às propriedades nos sensores, como por exemplo: tempo de resposta, desvios térmicos, dependência de temperatura, erro direcional, estabilidade, linearidade, seletividade espectral e resposta de inclinação.



Algumas estações meteorológicas também dispõem de outros instrumentos para medida da radiação solar e insolação na superfície terrestre. Entre estes instrumentos, os mais comuns são os heliógrafos (Figura 22) que medem o número efetivo de horas diárias de brilho solar ou a insolação. Um heliógrafo basicamente consiste de uma esfera de cristal que converge os raios solares sobre um fita de papel instalada sobre uma base curva abaixo da esfera. Na presença de irradiância solar direta (disco solar não bloqueado por nuvens) há a queima da fita. No final do dia mede-se o comprimento que foi queimado na fita e obtém-se o número de horas de radiação solar direta.



Figura 22. Heliógrafo para medida da insolação e fita de medição de horas de sol pleno durante um dia de céu limpo. Fonte: Adaptado de Wikipedia e IAG-USP.

Os actinógrafos ou piranógrafos, registram o fluxo de radiação solar global horizontal, normalmente em cal/min/cm². Os actinógrafos mais utilizados, como o mostrado na Figura 23, são composto por sensores baseados na expansão diferencial de um par bimetálico. Estes sensores são conectados a uma caneta tipo pena que registra o valor instantâneo da radiação solar. Estes instrumentos, apesar de serem encontrados em estações meteorológicas desde o início do século passado, apresentam uma baixa precisão (entre 15 a 20%).





Figura 23. Actinógrafo para medida da radiação solar global horizontal. Visualiza-se a caneta registradora e o papel milimetrado para impressão do valor instantâneo da radiação solar incidente. Fonte: Adaptado de WMO.

Estações dedicadas à medida da radiação solar podem dispor de instrumentos mais sofisticados para a obtenção das componentes difusa e direta da radiação solar. Para obtenção da parcela difusa da radiação solar emprega-se geralmente um piranômetro associado com um anel de sombreamento. A função deste anel é bloquear a parcela direta da radiação solar. O anel de sombreamento deve estar posicionado paralelo ao plano equatorial e para acompanhar a variação da declinação solar é necessário um ajuste diário da posição do anel de sombra. Pelo fato de bloquear uma parcela da componente difusa presente no campo de visão obscurecido pelo anel de sombra é necessário aplicar um fator de correção para compensar este efeito. Devido a anisotropia da irradiância difusa, o modelo a ser empregado para obter esta correção pode ser complexo. Para evitar o efeito de bloqueio de céu, alguns sistemas de medida da componente difusa utilizam sistema de rastreamento solar com disco ou esfera para impedir a incidência da parcela direta da radiação solar. Este tipo de montagem é mais cara e complexa, mas não depende de ajuste manual e diário, como no caso do anel de sombra. A Figura 24 mostra estes dois sistemas destinados à obtenção da parcela difusa da radiação solar.

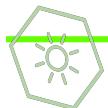




Figura 24. Instrumentos utilizados para medida da componente difusa da radiação solar. À esquerda montagem de sistema com piranômetro e anel de sombra. À direita piranômetros, pireliômetro e sistema de rastreamento com esferas para bloqueio do disco solar. Fonte: Adaptado de Kipp & Zonen.

A obtenção da componente direta da radiação solar pode ser obtida através de um radiômetro denominado pireliômetro. Este instrumento possui um campo de visão bastante estreito (< 5 graus) com intuito de receber apenas a radiação emitida pelo disco solar. O pireliômetro possui um mecanismo para acompanhamento do Sol que pode ser manual ou automático.

No Rio Grande do Sul apenas as estações solarimétricas da rede SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) mantida pelo INPE e UFSM em São Martinho da Serra e a estação de radiometria solar da UERGS (vista na Figura 25) realizam medidas sistemáticas das componentes difusa, direta e global da irradiação solar.





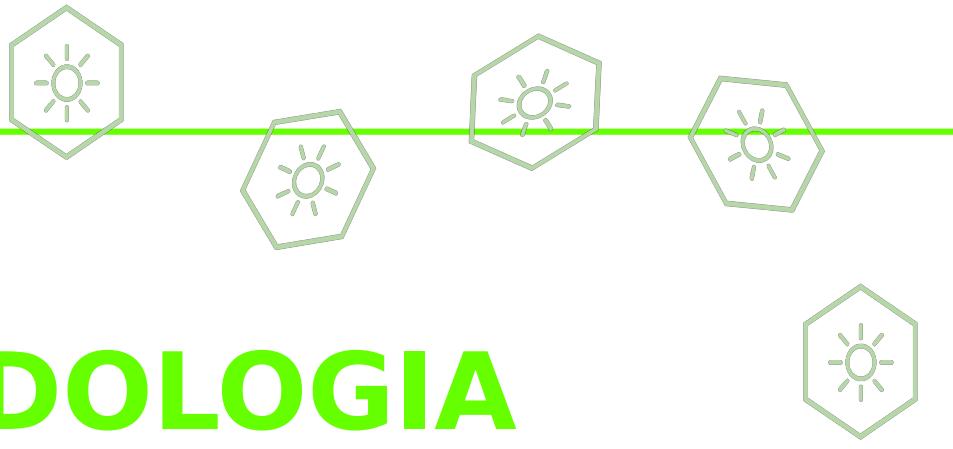
Figura 25. Estação de radiometria solar da UERGS, unidade Porto Alegre. Esta estação realiza medidas das componentes direta, difusa e global da radiação solar além da obtenção de outros parâmetros meteorológicos. A estação opera de modo autônomo da rede elétrica e disponibiliza todos os dados coletados em tempo real.





Ivo Gonçalves/PMPA





METODOLOGIA EMPREGADA

Para elaboração do Atlas Solar do Rio Grande do Sul foram empregados dados oriundos das EMAs de 38 municípios do estado (Figura 26). Os conjuntos de dados de irradiação solar global horizontal, na unidade de kJ/m^2 , contam com históricos de medições que, em alguns municípios, ultrapassam 16 anos.

Em uma etapa de qualificação inicial, foram descartados municípios e, em alguns casos, períodos específicos de medições seguindo alguns critérios: municípios com menos de três anos de medições ou que possuíam períodos do histórico de medição com grande parte dos seus dados faltantes foram descartados ou tiveram o seu período faltante excluído. Na construção de padrões temporais para variáveis climatológicas como a radiação solar, quanto maior o histórico de medição, mais eficaz o resultado final, devido à sazonalidade de seu comportamento.

Após a etapa de seleção inicial, os dados foram analisados em relação a sua consistência física, a partir de modelos de estimativa para a radiação solar global horizontal. Os seguintes valores de consistência física foram aplicados para a irradiação solar global horizontal integrada na base horária em:

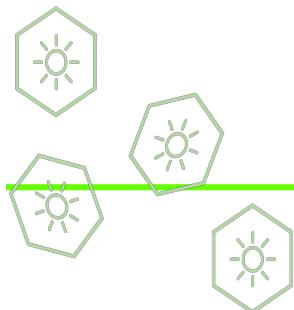
$$0,03 \cdot G_0 \leq G$$

$$G \leq G_0$$

onde G_0 representa a irradiação extraterrestre e G a irradiação global horizontal medida.



Figura 26. Mapa com a localização das estações meteorológicas automáticas (EMAs) do INMET utilizadas para elaboração do Atlas Solar do Rio Grande do Sul.



Para identificar valores anômalos entre as sequências de intervalos horários medidos, aplicou-se a metodologia descrita por Journée and Bertrand (2011) aos pares consecutivos dos valores observados nas horas (i) e ($i-1$):

$$\left| \frac{G^{(i)}}{G_0} - \frac{G^{(i-1)}}{G_0} \right| < 0,75$$

Realizada a verificação inicial e seleção das estações EMAs a serem analisadas, os dados passaram por uma etapa de tratamento para o preenchimento de eventuais dados faltantes nas planilhas, isso é, aqueles decorrentes de falhas operacionais do piranômetro ou da estação ao longo de todas as séries temporais nas EMAs analisadas. Foi adotada a metodologia descrita por Hoyer-Klick (2009). Falhas de dados com períodos inferiores à três horas consecutivas foram interpoladas com os valores medidos consecutivos mais próximos. As interpolações levaram em consideração somente os dados originais e considerados válidos das planilhas, isso é, falhas maiores que uma hora não são consideradas no cálculo os valores já interpolados.

Falhas maiores que três horas e menores que quatro dias foram preenchidos por meio da média dos valores horários mais próximos (até 96 horas distantes) para horários idênticos. No caso dos dados mais próximos também conterem falhas, foi empregada a mesma metodologia para dados faltantes por mais de 4 dias que foram preenchidas com a média dos valores para a mesma hora, dia e mês do ano anterior e posterior. No caso da falha se localizar no primeiro ou último ano de medição, foi empregado apenas o valor do ano anterior ou seguinte disponível.

Os dados qualificados e tratados para os 38 municípios do Rio grande do Sul são mostrados na Tabela 1. Os valores para a radiação solar global horizontal na Tabela 1 estão distribuídos em função dos valores médios mensais, sazonais e anual.

Tabela 1. Valores médios mensais, sazonais e anual para a radiação solar global horizontal nos municípios do estado do Rio Grande do Sul que tiveram as estações EMA do INMET analisadas no Atlas Solar do Rio Grande do Sul. Estes valores correspondem aos dados qualificados e tratados.

MUNICÍPIO	RADIAÇÃO kWh/m ² /dia													ANUAL			
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ver.	Out	Inv.	Prim.	
Alegrete	7,031	6,165	5,561	4,410	3,145	2,576	2,821	3,513	4,485	5,734	6,857	7,328	6,841	4,372	2,970	5,692	4,982
Bagé	7,099	6,117	5,487	4,351	3,109	2,571	2,798	3,304	4,241	5,531	6,859	7,520	6,912	4,316	2,891	5,544	4,927
Bento Gonçalves	6,333	5,661	4,860	4,145	2,983	2,440	2,813	3,374	4,090	4,953	6,311	6,630	6,208	3,996	2,876	5,118	4,544
Caçapava do Sul	6,843	5,986	5,299	4,248	2,969	2,563	2,669	3,370	4,166	5,375	6,457	7,131	6,654	4,172	2,867	5,333	4,767
Camaquã	6,071	5,262	4,488	3,830	2,793	2,239	2,429	2,839	3,575	4,635	5,980	6,439	5,924	3,704	2,502	4,730	4,214
Canela	5,959	5,304	4,663	4,059	2,875	2,514	2,778	3,220	4,010	5,007	6,019	6,322	5,862	3,866	2,837	5,012	4,388
Canguçu	6,229	5,634	4,843	3,984	2,835	2,368	2,603	2,956	3,754	4,873	6,204	6,612	6,158	3,887	2,642	4,944	4,360
Cruz Alta	6,841	5,753	5,173	4,529	3,265	2,676	3,045	3,627	4,232	4,929	6,625	7,114	6,569	4,322	3,116	5,262	4,814
Dom Pedrito	7,199	6,039	5,547	4,266	3,044	2,620	2,878	3,506	4,599	5,802	7,070	7,424	6,887	4,286	3,001	5,824	5,042
Erechim	6,466	5,912	5,222	4,351	3,189	2,777	3,132	3,706	4,421	4,989	6,500	6,769	6,383	4,254	3,205	5,303	4,780
Frederico Westphalen	6,588	5,713	5,171	4,326	3,117	2,610	2,965	3,629	4,260	5,209	6,380	6,818	6,373	4,205	3,068	5,283	4,728
Jaguarão	6,823	5,710	4,990	3,820	2,680	2,244	2,402	2,851	3,862	5,082	6,380	6,937	6,490	3,830	2,499	5,108	4,500
Lagoa Vermelha	6,426	5,824	5,118	4,252	3,064	2,632	2,992	3,514	4,254	4,889	6,424	6,752	6,334	4,145	3,046	5,189	4,676
Mostardas	7,147	6,163	5,358	4,127	3,095	2,642	2,697	3,324	4,164	5,543	6,767	7,368	6,893	4,194	2,888	5,491	4,868
Palmeira das Missões	6,521	5,915	5,225	4,461	3,290	2,736	3,060	3,652	4,129	4,817	6,345	6,189	6,208	4,326	3,149	5,097	4,748
Passo Fundo	6,421	5,876	4,994	4,334	2,578	2,570	2,972	3,437	4,143	4,935	6,286	6,849	6,382	3,969	2,993	5,122	4,678
Porto Alegre	6,228	5,641	4,768	3,638	2,597	2,156	2,375	2,937	3,764	4,789	5,707	6,142	6,004	3,668	2,489	4,754	4,228
Quaraí	7,036	6,084	5,535	4,327	2,975	2,527	2,822	3,524	4,429	5,754	6,677	7,296	6,805	4,279	2,957	5,620	4,925
Rio Grande	6,572	5,523	4,950	3,873	2,771	2,306	2,400	3,025	3,948	5,108	6,376	6,895	6,330	3,865	2,577	5,144	4,373
Rio Pardo	6,503	5,808	4,929	3,985	2,939	2,333	2,529	3,054	3,870	4,852	6,190	6,836	6,382	3,951	2,639	4,970	4,489
Santa Maria	6,424	5,587	4,867	3,988	2,895	2,320	2,586	3,026	3,884	4,884	6,125	6,858	6,290	3,917	2,644	4,964	4,461
Santa Rosa	6,789	5,888	5,318	4,428	3,110	2,581	2,884	3,609	4,343	5,637	6,481	6,849	6,509	4,285	3,025	5,487	4,823
Santana do Livramento	6,895	5,871	5,110	3,907	2,823	2,271	2,748	3,266	4,136	5,471	6,468	6,627	6,464	3,947	2,762	5,358	4,633
Santiago	6,896	5,950	5,046	4,512	3,281	2,789	2,937	3,579	4,453	5,399	6,697	7,196	6,681	4,280	3,101	5,516	4,965
Santo Augusto	6,573	5,928	5,003	4,187	3,247	2,533	2,866	3,464	4,144	4,810	6,199	6,255	6,252	4,145	2,954	5,051	4,606
São Borja	7,037	6,042	5,508	4,483	3,330	2,705	3,003	3,727	4,635	5,643	6,738	7,182	6,754	4,441	3,145	5,672	5,007
São Gabriel	6,986	6,048	5,363	4,272	2,971	2,468	2,592	3,285	4,209	5,518	6,623	7,310	6,781	4,202	2,782	5,450	4,811
São José dos Ausentes	5,858	5,371	4,878	4,215	3,127	2,734	3,125	3,614	4,250	5,016	6,160	6,279	5,836	4,073	3,158	5,142	4,544
São Luiz Gonzaga	7,008	6,047	5,683	4,622	3,322	2,820	3,106	3,721	4,551	5,567	6,807	7,201	6,752	4,542	3,216	5,642	5,039
Soleadade	6,450	5,757	5,124	4,221	2,959	2,608	2,847	3,471	4,274	5,457	6,954	6,945	6,384	4,101	2,975	5,562	4,749
Torres	6,221	5,572	4,749	4,139	3,148	2,532	2,777	3,306	4,049	4,979	6,118	6,469	6,087	4,012	2,872	5,049	4,501
Tramandaí	6,652	5,888	5,066	4,080	3,015	2,408	2,577	3,210	3,845	5,288	6,382	6,845	6,462	4,053	2,732	5,171	4,606
Uruguaiana	7,191	6,266	5,569	4,456	3,194	2,494	3,002	3,594	4,164	5,602	6,899	7,196	6,884	4,406	3,030	5,555	5,006
Vacaria	6,026	5,565	4,911	3,537	3,071	2,596	2,966	3,543	4,025	5,060	5,962	6,300	5,964	3,840	3,035	5,016	4,396

Conforme previsto pela metodologia de validação, foram selecionados apenas os municípios que apresentavam mais de três anos de medições válidas de radiação global horizontal. Conforme a Tabela 2, que apresenta a localização das EMAs e o tempo de coleta de dados, os municípios Campo Bom, Ibirubá e Teutônia foram descartados na elaboração deste Atlas.

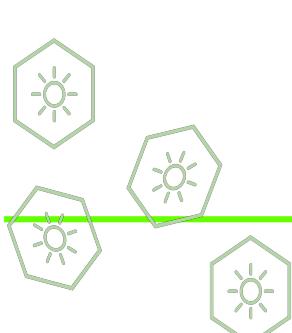


Tabela 2. Localização das Estações Meteorológicas Automáticas analisadas e tempo de medição disponível para análises

Estação	Lat (°)	Long (°)	Anos de medição
Alegrete	-29,71160	-55,5261	7,5
Bagé	-31,34780	-54,01330	7,2
Bento Gonçalves	-29,16720	-51,53470	7,2
Caçapava do Sul	-30,54770	-53,46750	6,2
Camaquã	-30,81060	-51,83470	7,2
Campo Bom	-29,67440	-51,64200	0,3
Canela	-29,36880	-50,82740	4,6
Canguçu	-31,40580	-52,70110	6,2
Chuí	-33,7418	-53,3714	5
Cruz Alta	-28,60300	-53,67360	6,8
Dom Pedrito	-30,99250	-54,81530	3,9
Erechim	-27,66030	-52,30640	7,2
Frederico Westphalen	-27,39560	-53,42940	6,2
Ibirubá	-28,65350	-53,11190	1,2
Jaguarão	-32,55420	-53,37640	7,2
Lagoa Vermelha	-28,22190	-51,51220	7,1
Mostardas	-31,24780	-50,90570	6,1
Palmeira das Missões	-27,91990	-53,31740	6,1
Passo Fundo	-28,22940	-52,40390	7,2
Porto Alegre	-30,05000	-51,16660	13,3
Quaraí	-30,36860	-56,43720	6,2
Rio Grande	-32,07890	-52,16780	11,3
Rio Pardo	-29,87330	-52,38250	7,2
Santa Maria	-29,70000	-53,70000	7,2
Santa Rosa	-27,89010	-54,47970	6,2
Santana do Livramento	-30,84220	-55,61310	13
Santiago	-29,19140	-54,88560	5,2
Santo Augusto	-27,85000	-53,78330	12,3
São Borja	-28,64940	-56,01560	6,3
São Gabriel	-30,34140	-54,31080	6,3
São José dos Ausentes	-28,75140	-50,05830	7,2
São Luiz Gonzaga	-28,41720	-54,96250	6,3
Soledade	-28,85360	-52,54170	6,1
Teutônia	-29,45010	-51,82420	1,5
Torres	-29,35030	-49,73310	7,2
Tramandaí	-30,00970	-50,13530	6,1
Uruguaiana	-29,84250	-57,08250	7,2
Vacaria	-28,51360	-50,88280	5,9



A Figura 27 ilustra a etapa de preenchimento dos dados faltantes. Estações Meteorológicas Automáticas como a situada no município de Bagé, por exemplo, que conteve em seu registro quase 100% dos dados validados no decorrer das séries temporais, exigiram menores medidas corretivas. Em contrapartida, a EMA da cidade de Rio Grande apresentou aproximadamente 20% de seus dados com falhas.

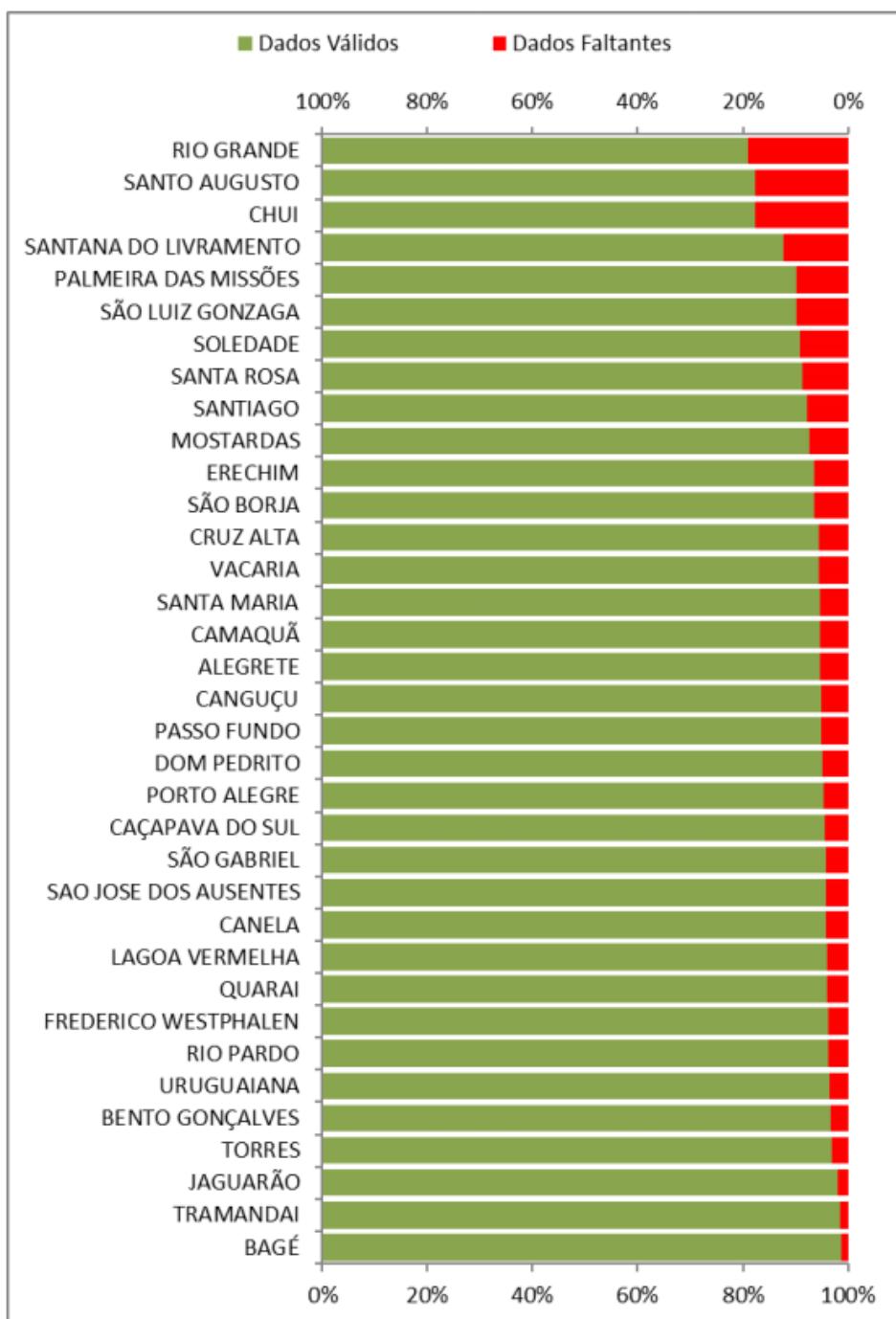


Figura 27. Percentual de dados válidos e faltantes nas EMAs analisadas.

A metodologia adotada para a elaboração dos mapas de radiação solar fez uso do método de interpolação espacial por meio de krigagem simples, que define que as médias locais empregadas serão constantes e semelhantes às médias da população, ao invés de estimadas com base nos pontos vizinhos.



MAPAS SOLARIMÉTRICOS



Seguindo a metodologia utilizada neste Atlas Solar do Rio Grande do Sul, foram gerados mapas solarimétricos com os valores médios de radiação na base temporal anual, mensal e sazonal. É observada uma grande homogeneidade nos valores de radiação solar na média anual, sendo o valor médio no Rio Grande do Sul igual a 4,67 kWh/m²/dia, com mínimo de 4,36 kWh/m²/dia e máximo de 5,01 kWh/m²/dia.

Os valores médios, mínimos e máximos são obtidos somando-se todas as grades (10 x 10 km) obtidas pela interpolação e dividindo a resultante pelo número de grades (média) e selecionando as grades com os valores máximos e mínimos. A Tabela 3 mostra os valores médios, máximos e mínimos para na base de tempo anual, mensal e sazonal para toda a área do Rio Grande do Sul. A Figura 28 apresenta a variação mensal dos valores médios de radiação solar em todo o território do Rio Grande do Sul.

Tabela 3. Valores mínimos, máximos e médios para na base de tempo anual, sazonal e mensal para toda a área do Rio Grande do Sul.

MAPAS	Radiação (kWh/m ² /dia)		
	Mínima	Máxima	Média
ANUAL	4,36	5,01	4,67
SAZONAL	Dez-Fev	5,93	6,83
	Mar-Mai	3,83	4,45
	Jun-Ago	2,54	3,16
	Set-Nov	4,93	5,63
MENSAL	Janeiro	5,99	7,11
	Fevereiro	5,46	6,15
	Março	4,8	5,5
	Abril	3,85	4,54
	Maio	2,59	3,33
	Junho	2,27	2,75
	Julho	2,43	3,07
	Agosto	2,93	3,71
	Setembro	3,77	4,54
	Outubro	4,84	5,65
	Novembro	6,05	6,78
	Dezembro	6,14	6,89

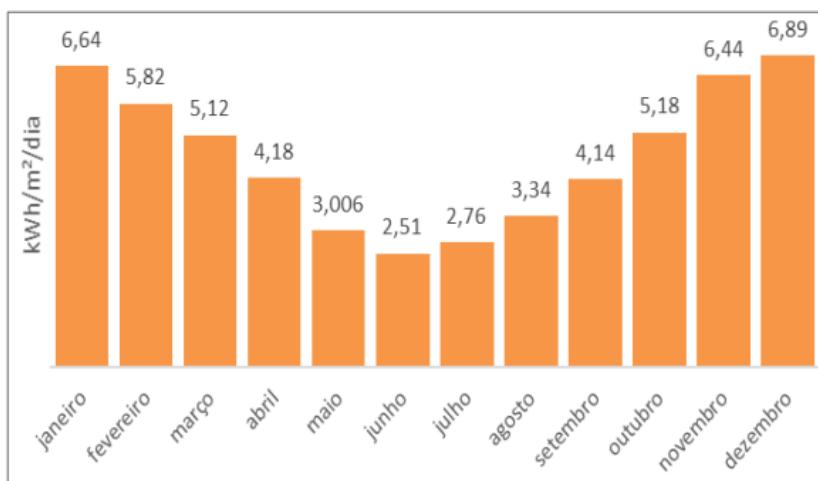


Figura 28. Valores diários médios mensais da radiação global horizontal em todo o território do Rio Grande do Sul.

A página 46 apresenta o total diário médio anual para a irradiação global horizontal. Nas páginas 47-50 temos os valores médios diárias sazonais para o verão, outono, inverno e primavera. Os valores médios mensais diárias (janeiro – dezembro) da irradiação global horizontal estão apresentados nas páginas 51 – 62.

Adotou-se uma única escala de cores para todos os mapas. Os limites mínimos e máximos para as escalas de cores também foram preservados em todos os mapas apresentados. Desta maneira, facilita-se a comparação direta entre todos os mapas. A escala de cores possui valor mínimo de 2,0 kWh/m²/dia e máximo igual a 7,0 kWh/m²/dia, como é visto na Figura 29.

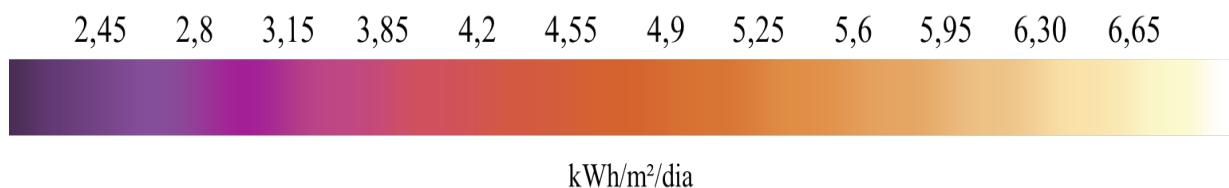
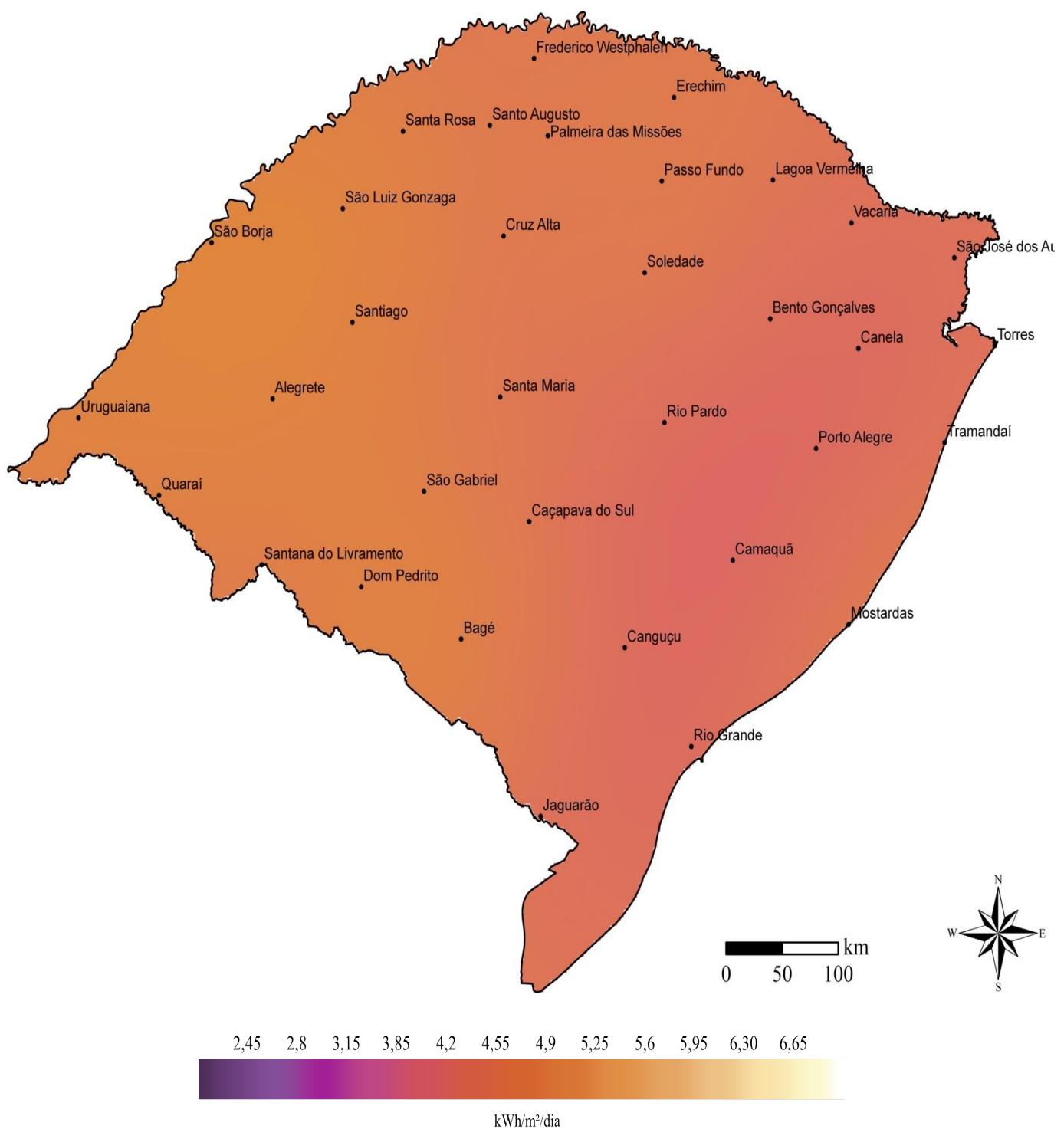
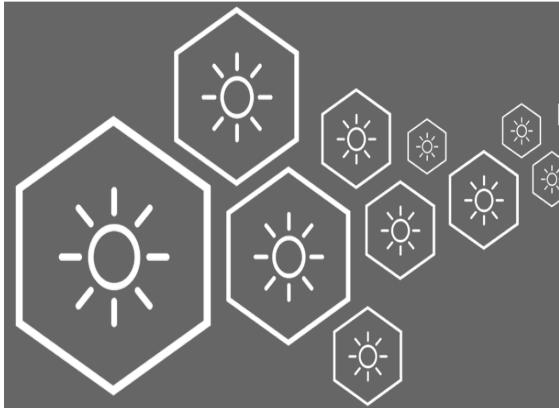
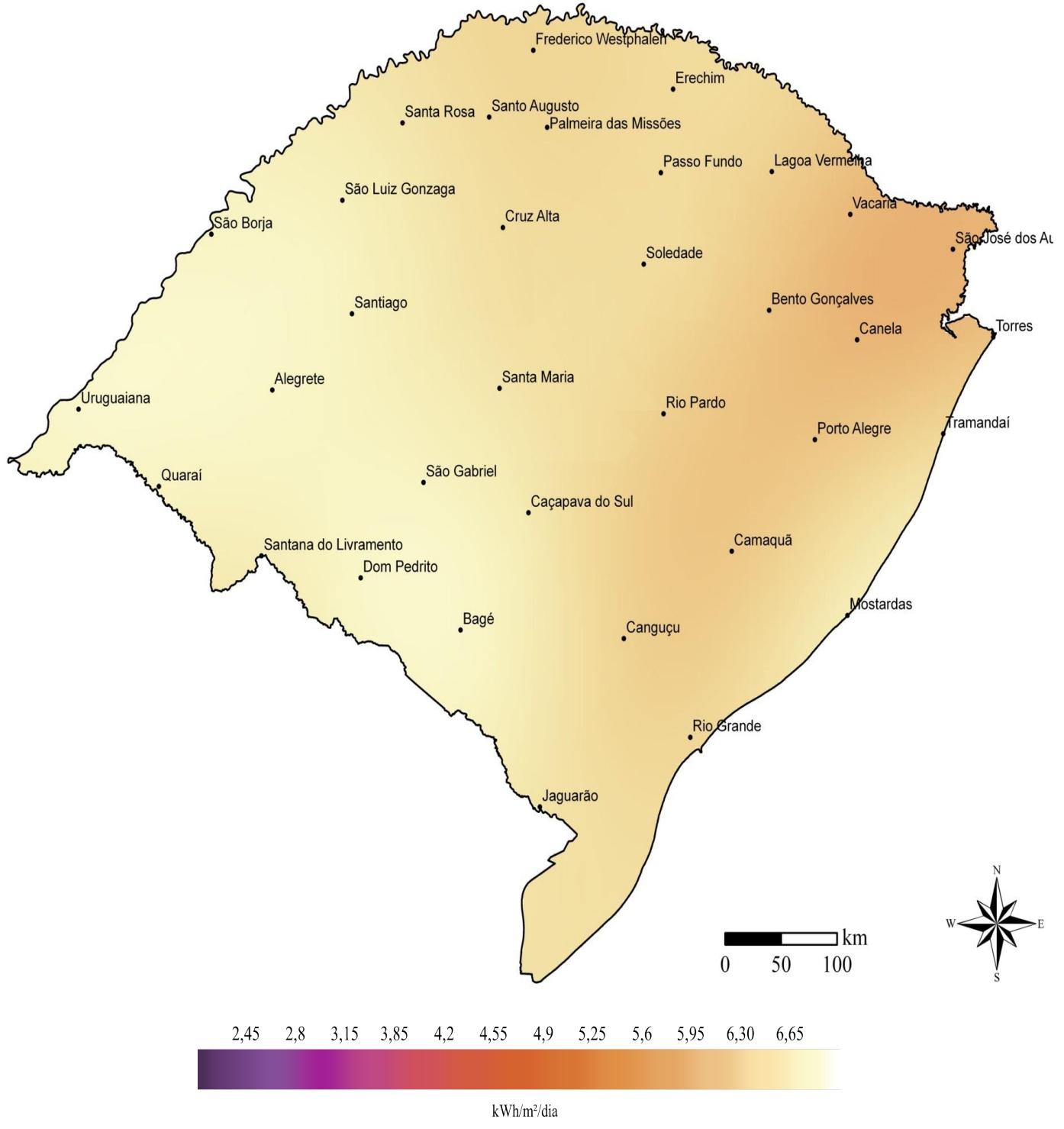
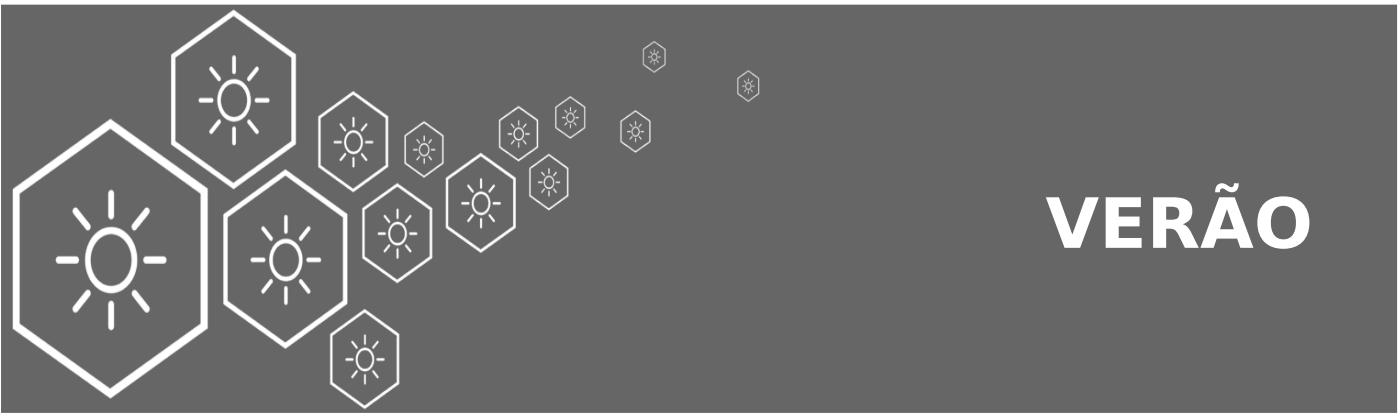


Figura 29. Escala de cores e valores utilizados nos mapas do Atlas Solar do Rio Grande do Sul.

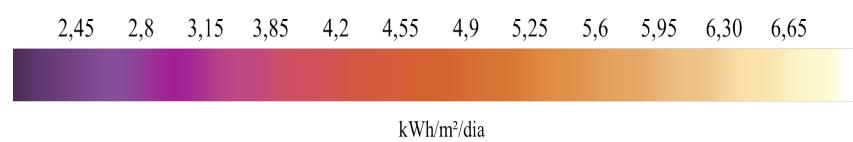
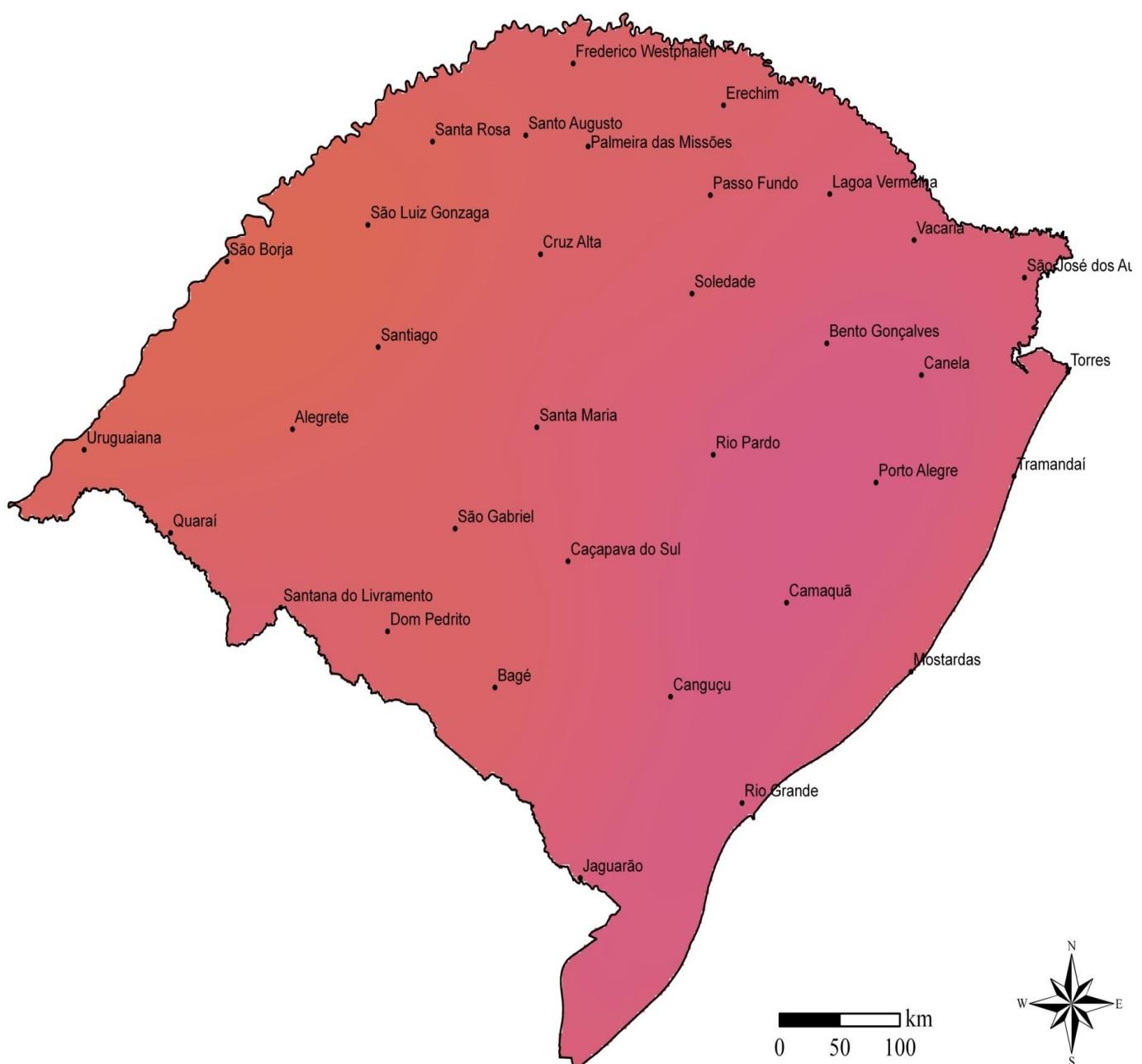


MÉDIA ANUAL

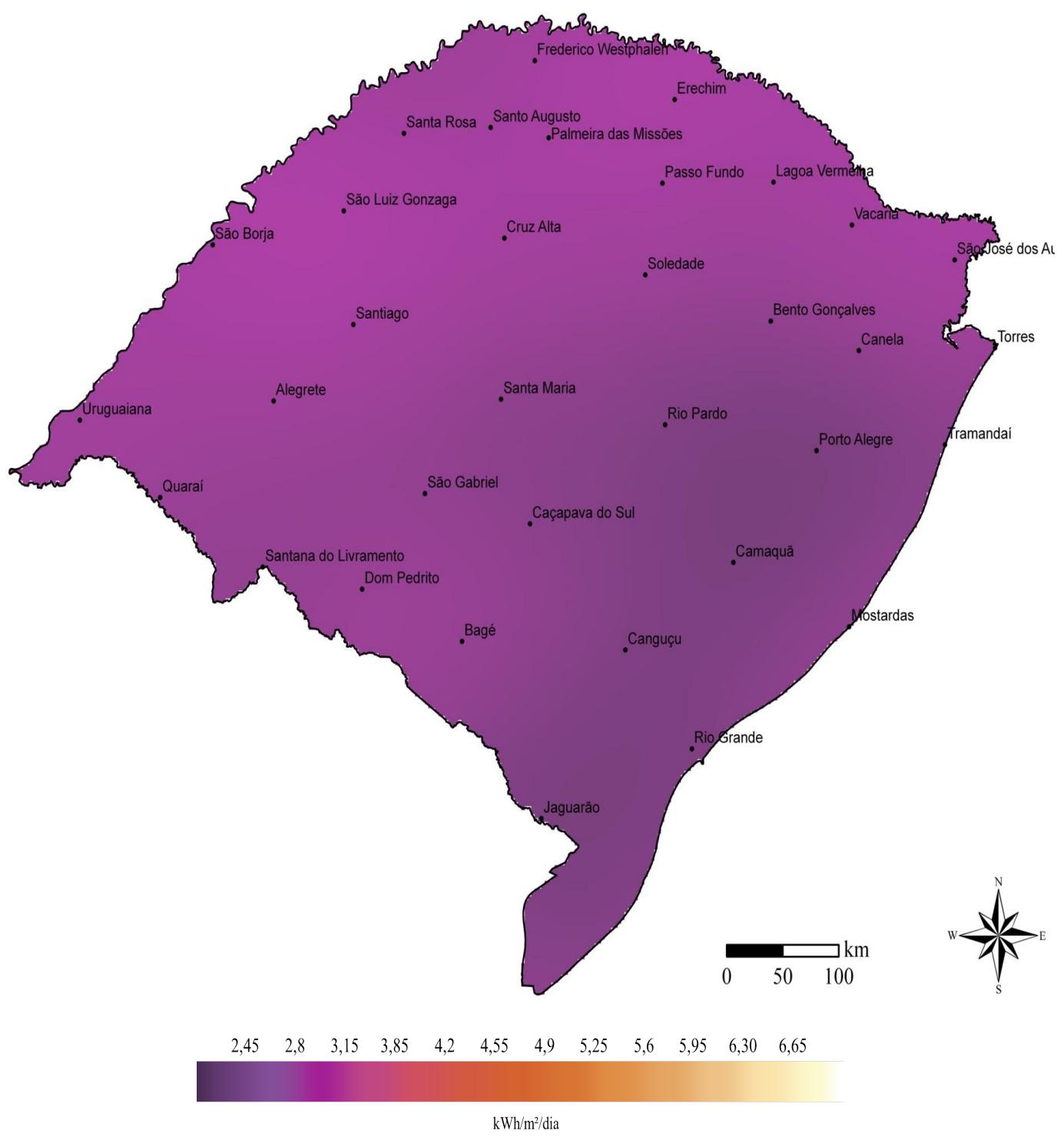




OUTONO



INVERNO





kWh/m²/dia

JANEIRO



2,45 2,8 3,15 3,85 4,2 4,55 4,9 5,25 5,6 5,95 6,30 6,65



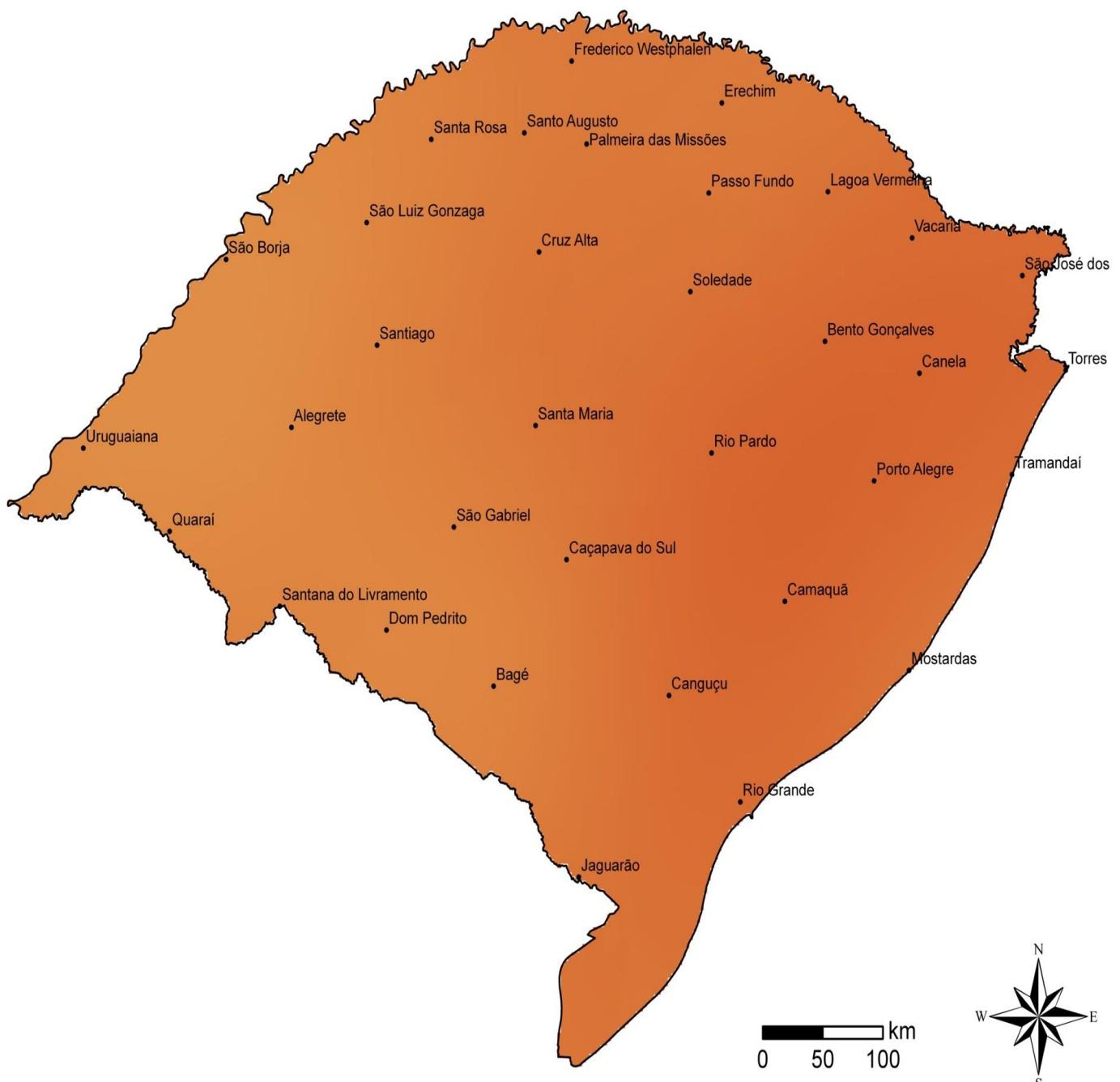
kWh/m²/dia

FEVEREIRO



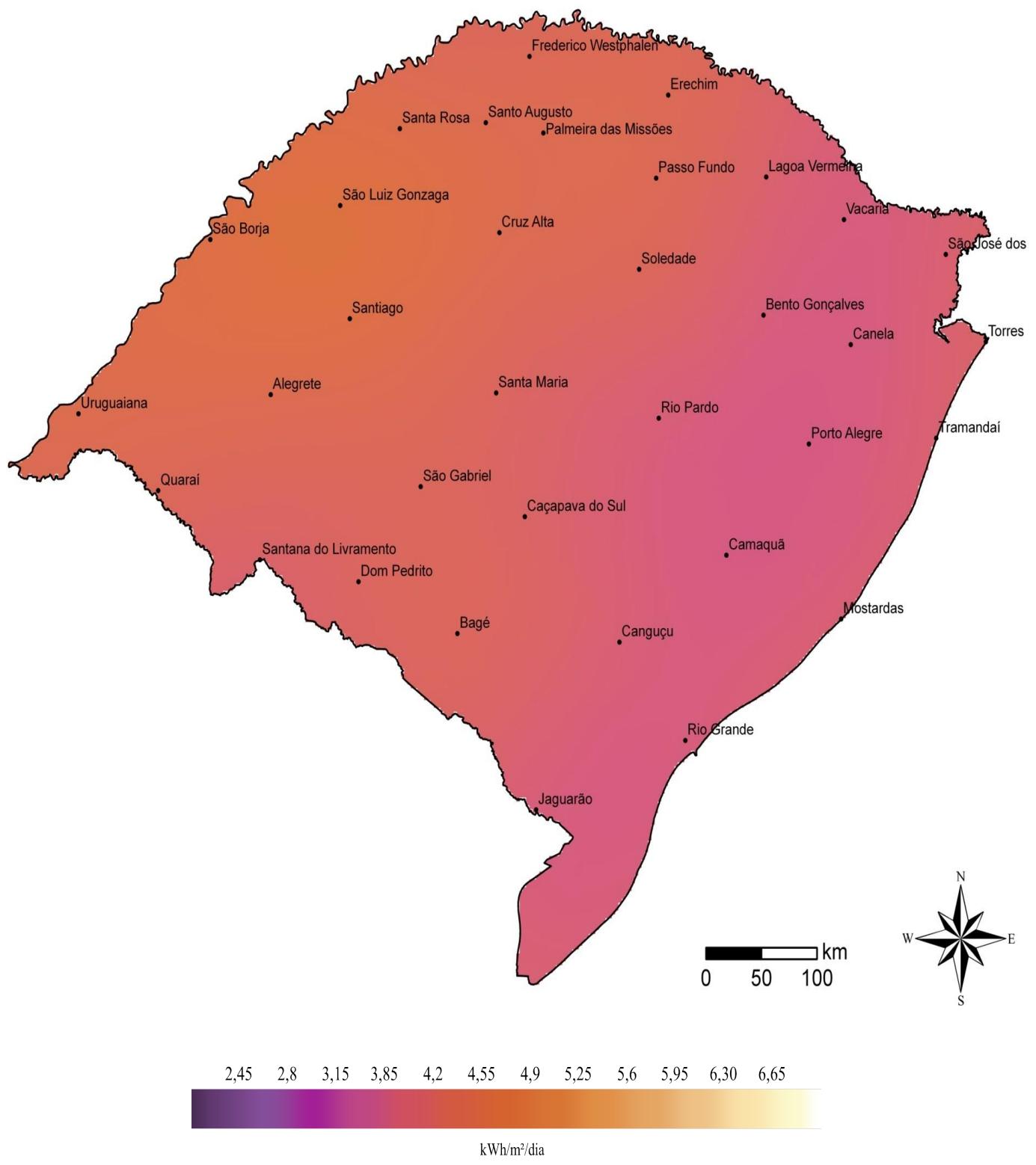
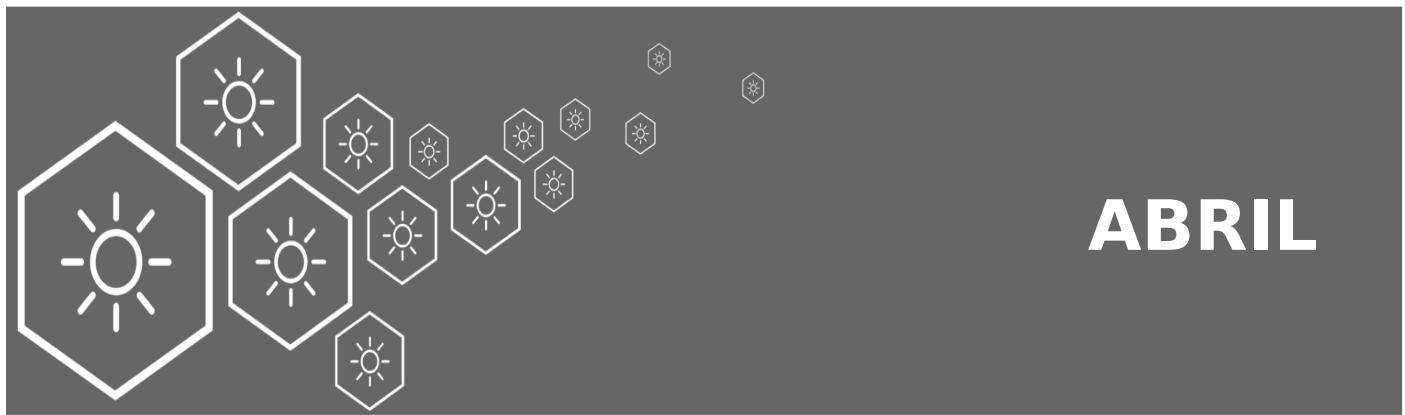
2,45 2,8 3,15 3,85 4,2 4,55 4,9 5,25 5,6 5,95 6,30 6,65

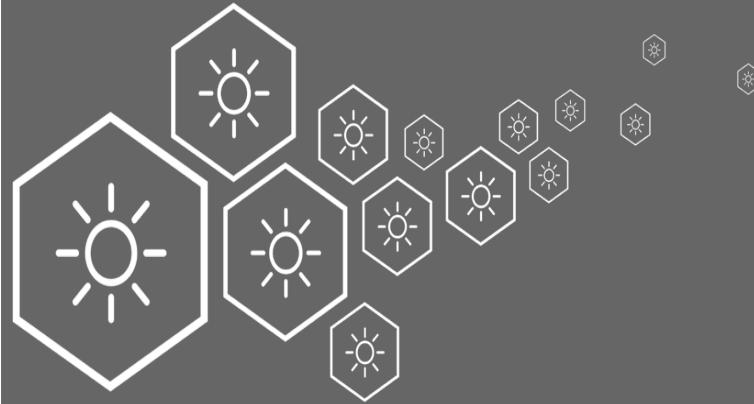
kWh/m²/dia



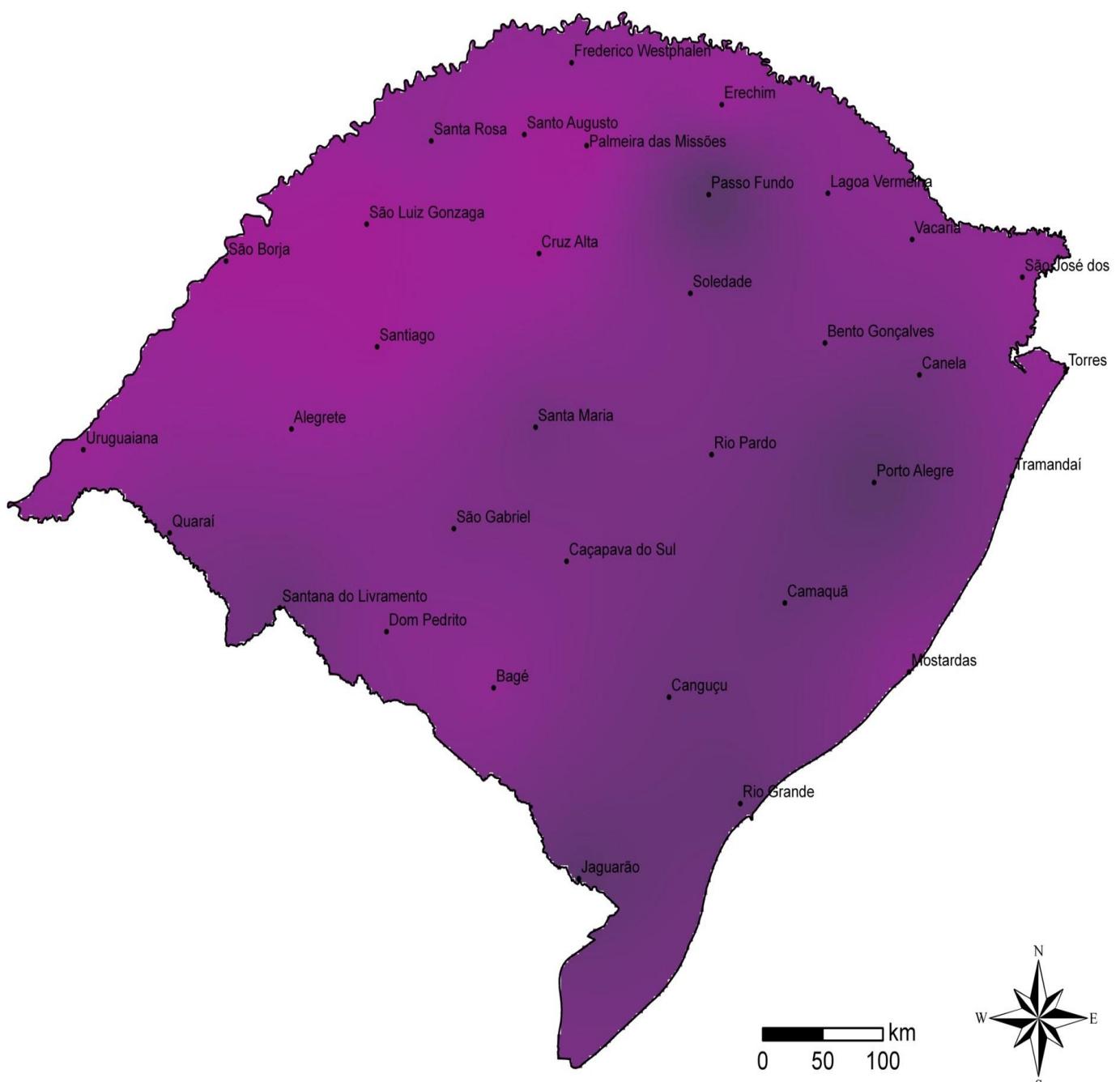
2,45 2,8 3,15 3,85 4,2 4,55 4,9 5,25 5,6 5,95 6,30 6,65

$\text{kWh}/\text{m}^2/\text{dia}$



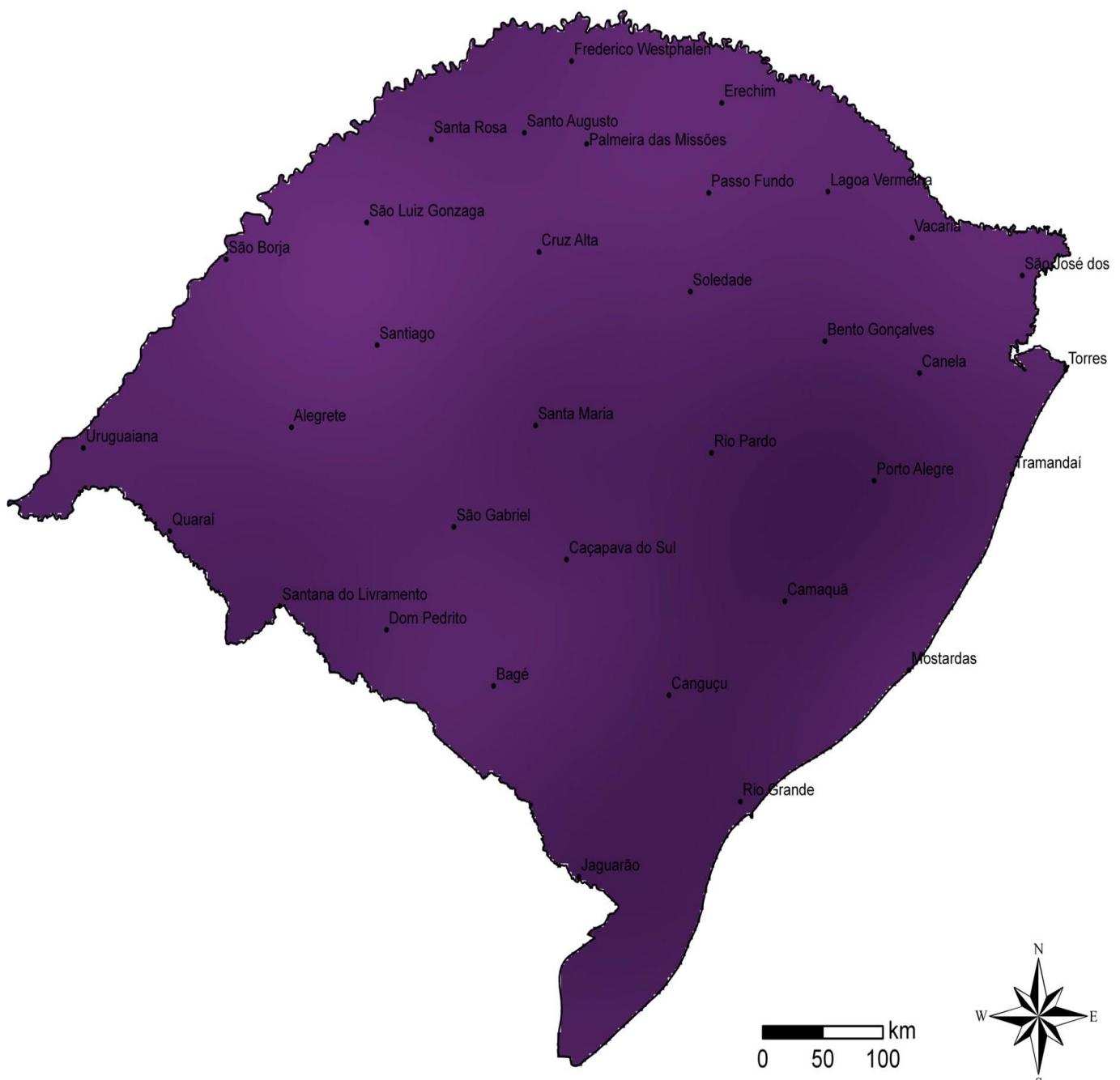


MAIO



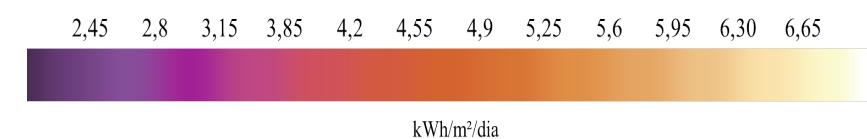
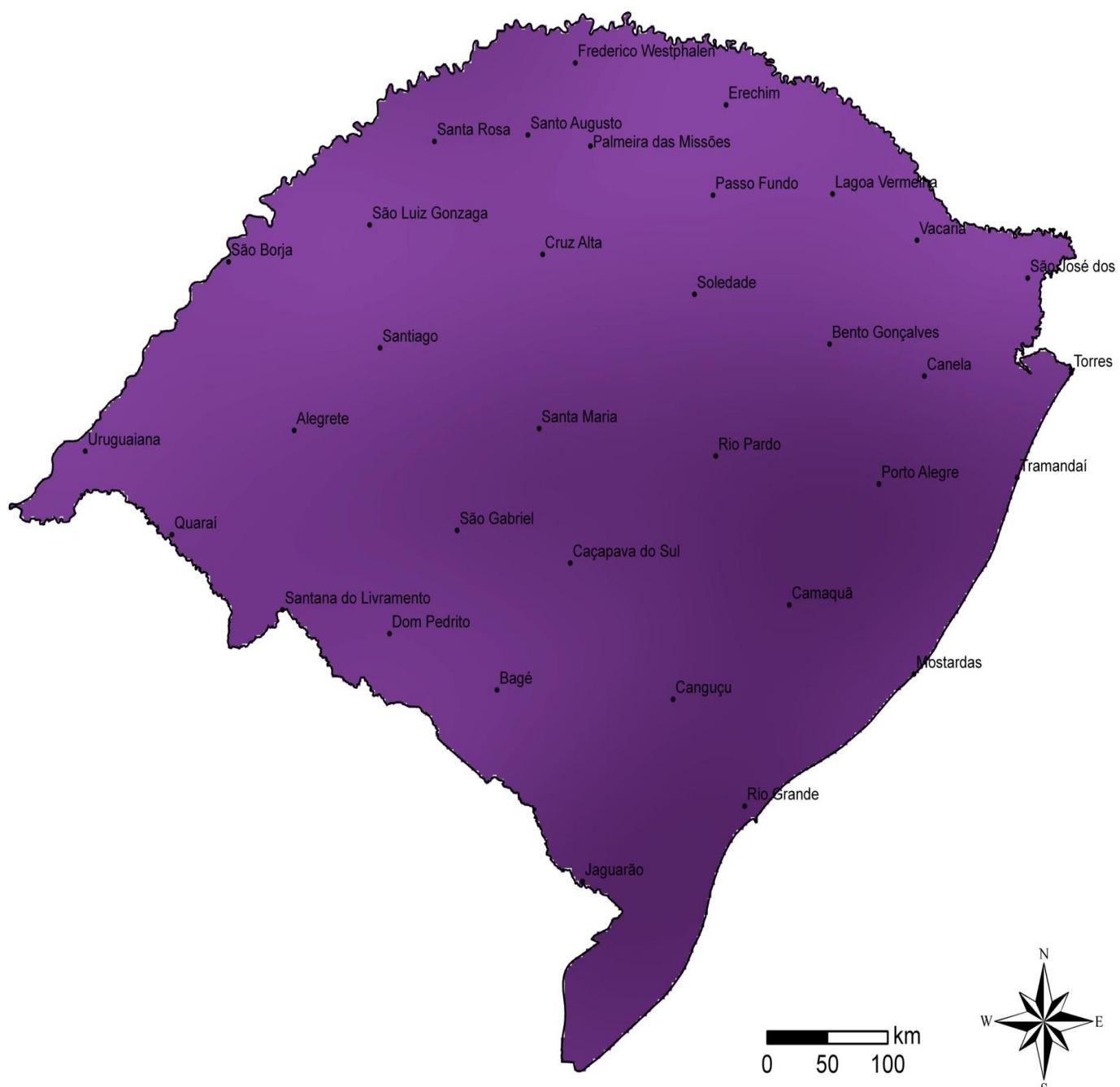
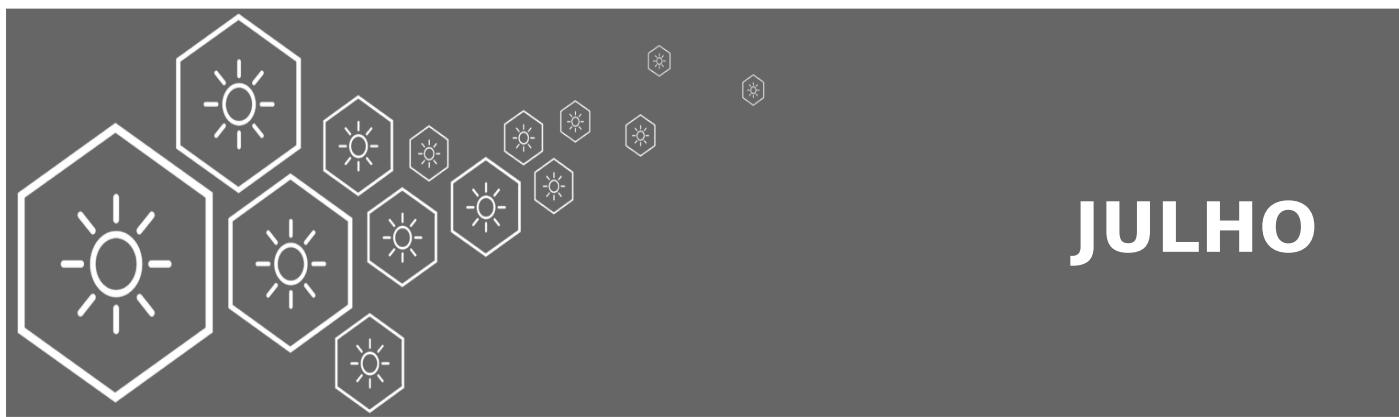
2,45 2,8 3,15 3,85 4,2 4,55 4,9 5,25 5,6 5,95 6,30 6,65

kWh/m²/dia

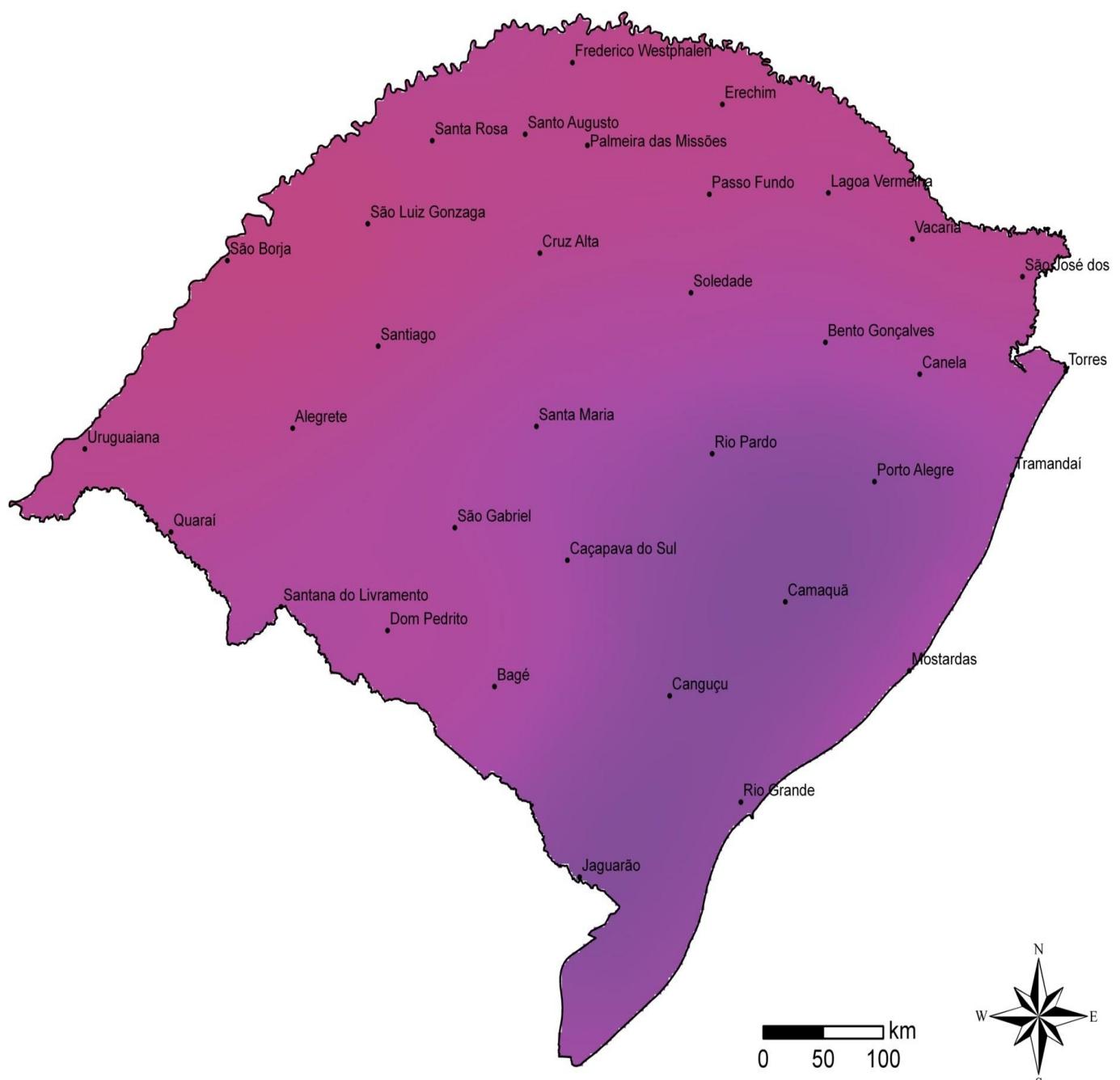
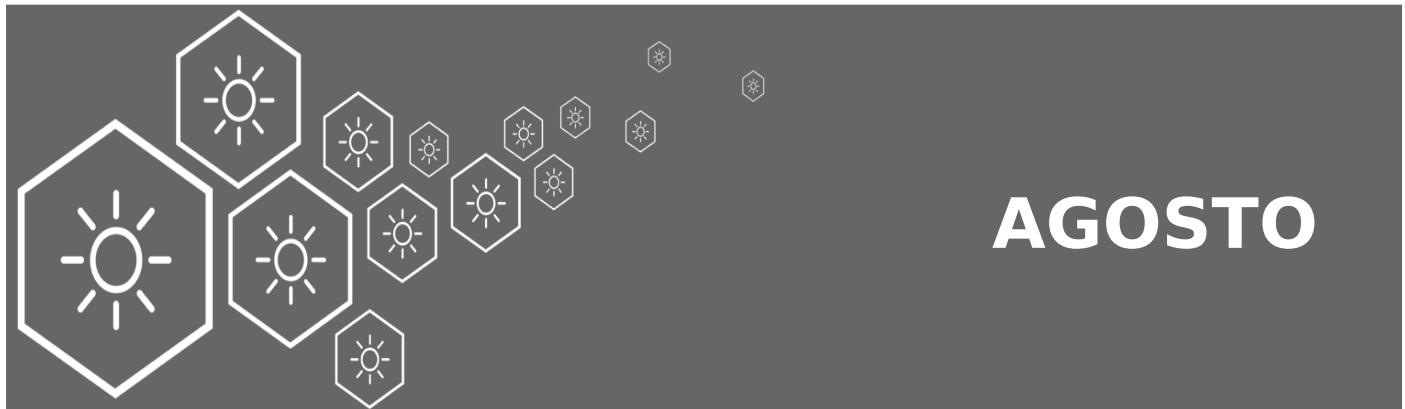


2,45 2,8 3,15 3,85 4,2 4,55 4,9 5,25 5,6 5,95 6,30 6,65

kWh/m²/dia



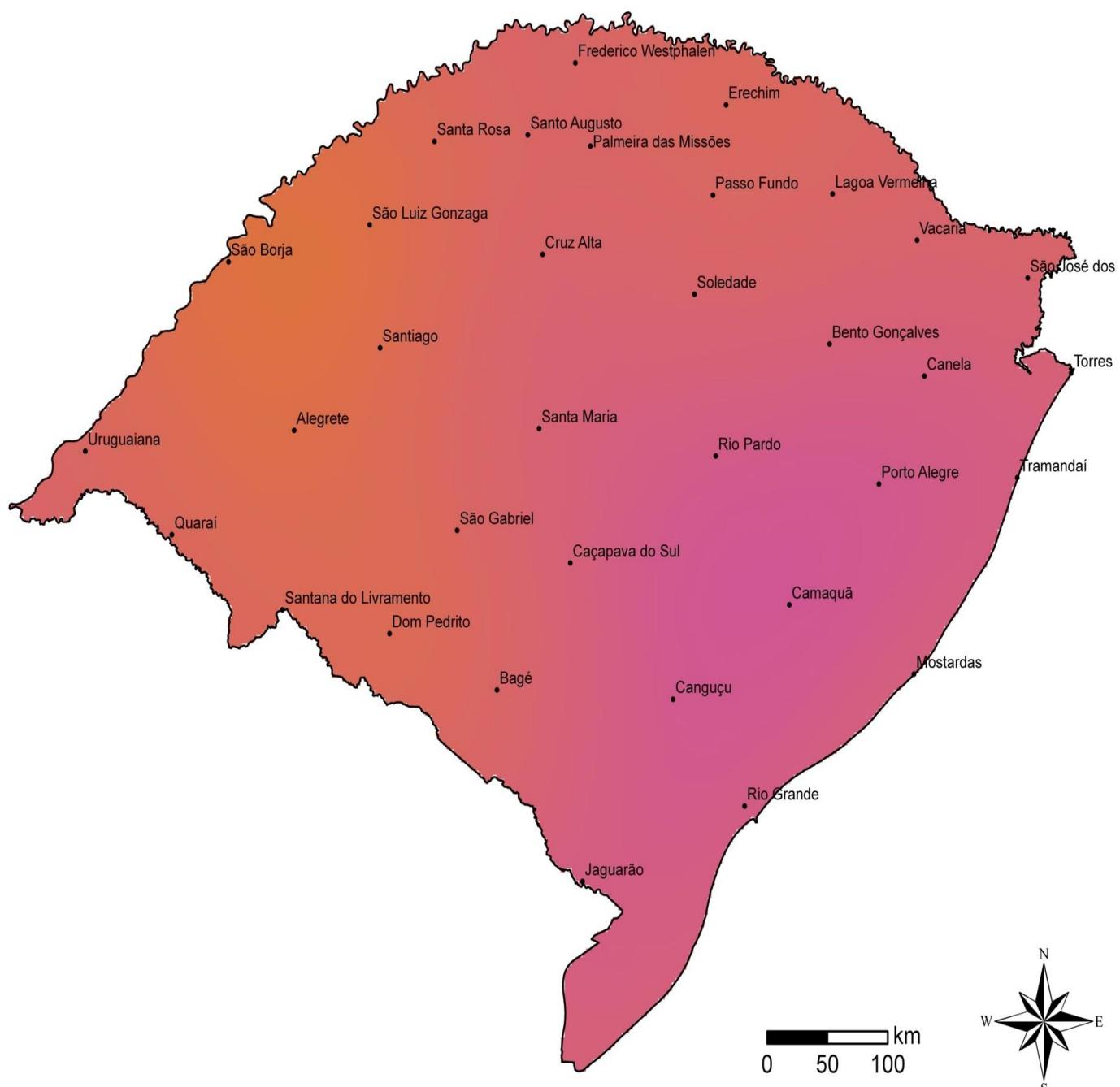
AGOSTO



2,45 2,8 3,15 3,85 4,2 4,55 4,9 5,25 5,6 5,95 6,30 6,65

kWh/m²/dia

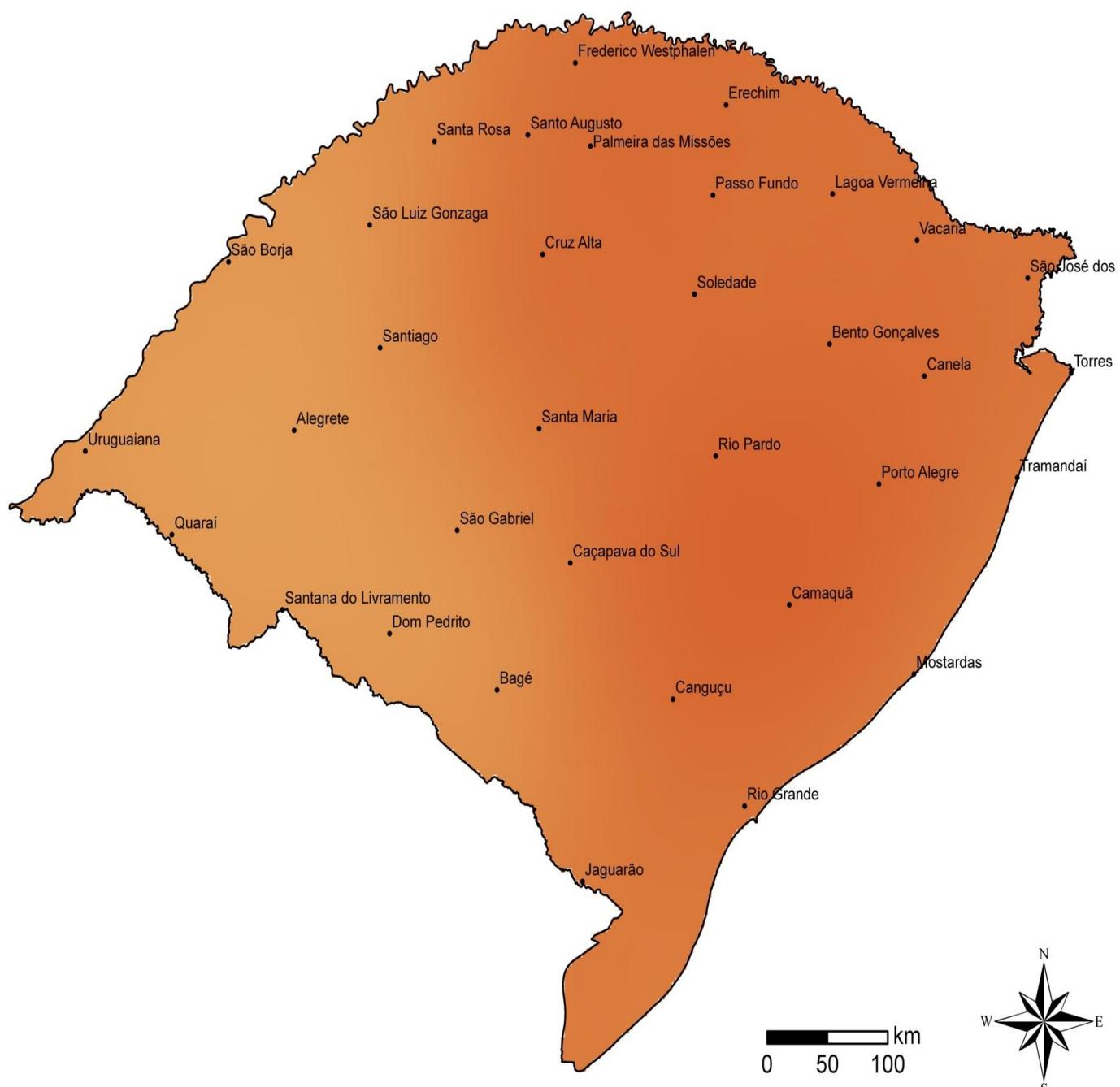
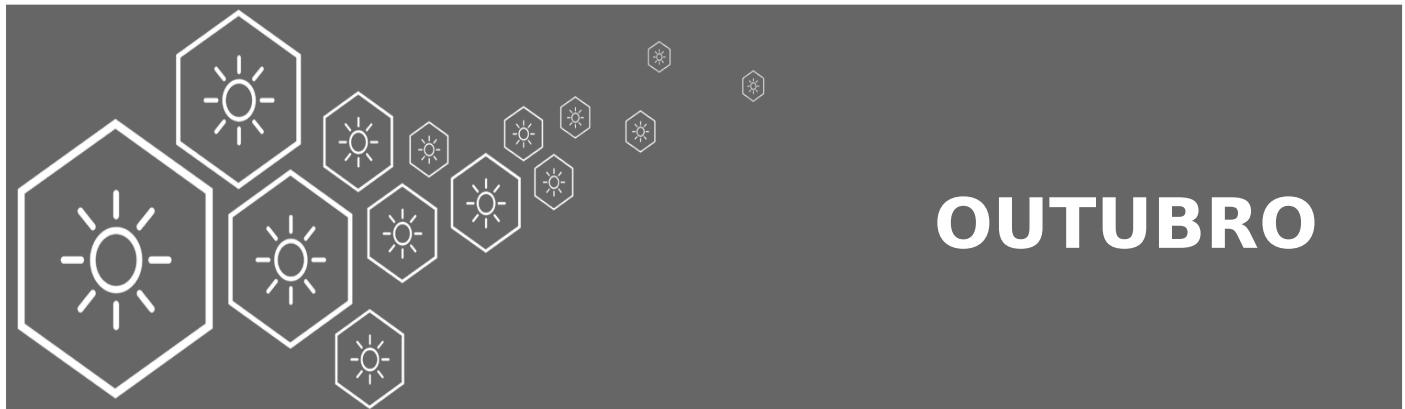
SETEMBRO



2,45 2,8 3,15 3,85 4,2 4,55 4,9 5,25 5,6 5,95 6,30 6,65

kWh/m²/dia

OUTUBRO



2,45 2,8 3,15 3,85 4,2 4,55 4,9 5,25 5,6 5,95 6,30 6,65

kWh/m²/dia



2,45 2,8 3,15 3,85 4,2 4,55 4,9 5,25 5,6 5,95 6,30 6,65

$\text{kWh/m}^2/\text{dia}$

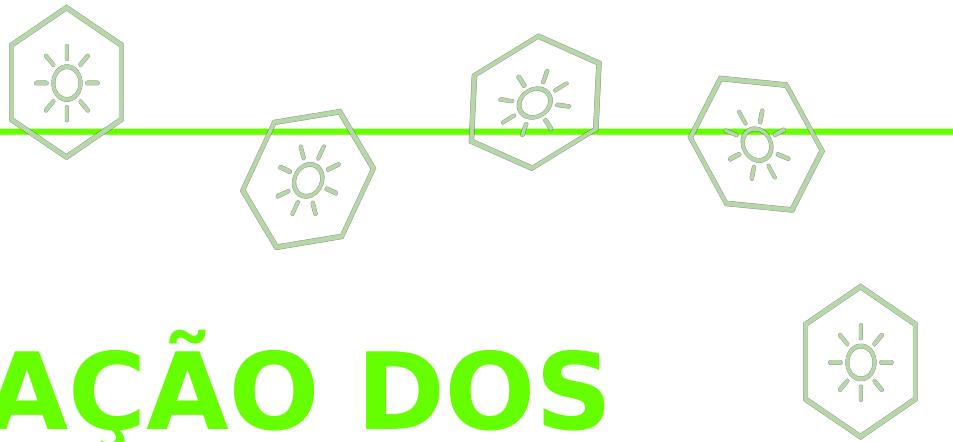
DEZEMBRO



2,45 2,8 3,15 3,85 4,2 4,55 4,9 5,25 5,6 5,95 6,30 6,65



kWh/m²/dia



VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Os valores mensais médios diários obtidos pela metodologia empregada no Atlas Solar do Rio Grande do Sul foram confrontados com resultados oriundos de dois modelos de reanálises e os fornecidos pela última versão do Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira, 2017).

Os dados fornecidos pelos modelos de reanálise são originados por um sistema de assimilação de dados preparados com uso de modelos de circulação geral da atmosfera, baseados na combinação de dados coletados em estações de superfície, boias oceânicas, satélites e radiosondas, permitindo a produção de dados de longo período, para uma ampla gama de variáveis. Os dados de radiação solar que foram comparados com os do Atlas Solar do Rio Grande do Sul têm origem em duas fontes:

- A) dados de reanálise do *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) desenvolvido pelo NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) em ponto de grade com resolução espacial de $0,5^\circ$ latitude x $0,5^\circ$ longitude, obtidos no (NCEP) (Saha et al., 2014);
- B) dados de reanálise *The Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2* (MERRA-2), com resolução espacial de $0,67^\circ$ latitude x $0,5^\circ$ longitude (Rienecker et. al., 2011).

Os resultados médios diários mensais em cada EMA analisada também foram comparados com os previstos pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar. Nesta comparação adotou-se os resultados disponíveis na base de dados do LABREN (Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia) / CCST (Centro de Ciência do Sistema Terrestre) / INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) – Brasil, que possuem uma resolução espacial de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (aproximadamente 10×10 km). A Figura 30 apresenta um diagrama resumido do sistema de validação adotado.

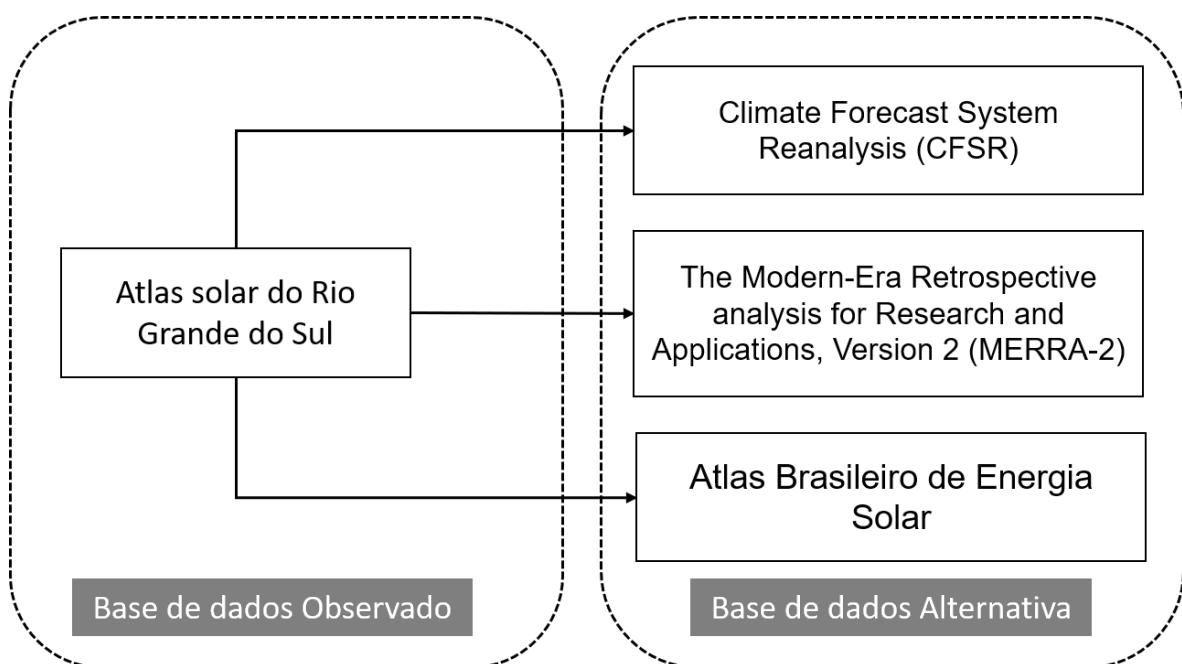


Figura 30. Diagrama resumido da metodologia de validação do Atlas Solar do Rio Grande do Sul.



Foram aplicados quatro métodos estatísticos, o Viés que mede a tendência dos dados em superestimar ou subestimar a radiação solar em relação ao observado. Esta tendência, também chamada de erro sistemático é definida como:

$$Viés = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Rad_{mod} - Rad_{obs})$$

onde N representa o número de medidas, Rad_{mod} a radiação modelada e Rad_{obs} a radiação solar observada ou prevista pela metodologia do Atlas Solar do Rio Grande do Sul.

A média dos erros absolutos (MAE na sigla em inglês), é considerada uma medida precisa, pois não leva em consideração os pontos fora da série (*outliers*), apresentando a habilidade dos modelos numéricos em reproduzir as condições observadas, sendo definido por:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Rad_{mod} - Rad_{obs}|$$

O Erro médio quadrático (MSE na sigla em Inglês) é similar ao MAE, porém mais sensível aos grandes erros, por elevar as diferenças individuais ao quadrado. Essa medida é frequentemente usada na verificação da acurácia de modelos numéricos. MSE é definido por:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Rad_{mod} - Rad_{obs})^2$$

Nas Figuras 31, 32 e 33, são apresentados os mapas do Viés de cada uma das bases de dados, CFSR, MERRA2 e do Atlas Brasileiro de Energia Solar, respectivamente, calculados a partir da irradiação estimada subtraída da irradiação observada, conforme descrito na metodologia. Um viés positivo indica uma superestimativa da radiação solar incidente, enquanto um viés negativo indica uma subestimativa, da base de dados alternativa em relação a base de dados do Atlas Solar do Rio Grande do Sul.

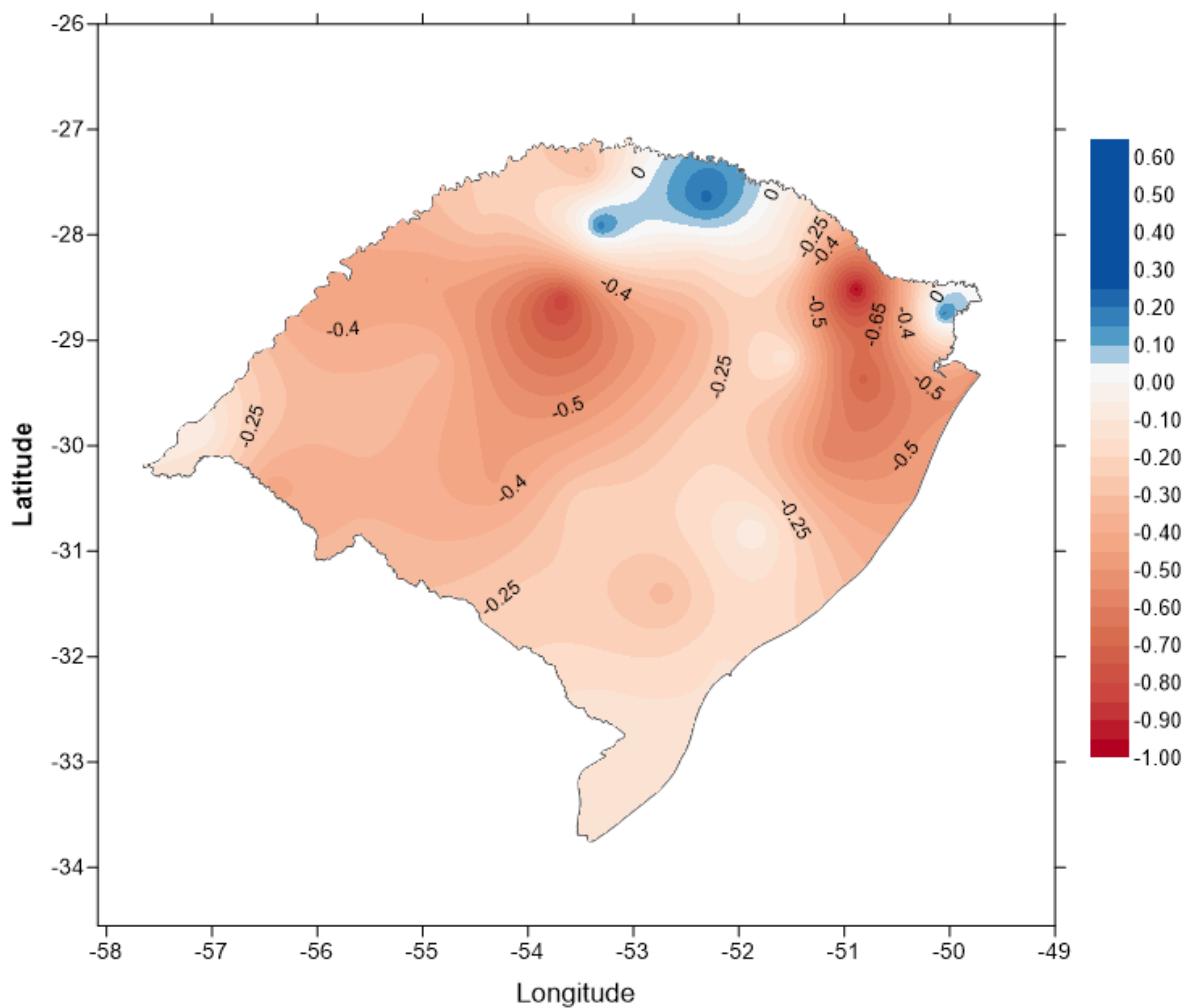


Figura 31. Mapa do Viés calculado a partir dos valores observados e os previstos pelo modelo CFSR.

A figura 31 mostra que o modelo CFSR superestima os dados observados somente em uma pequena porção da região Norte do estado do Rio Grande do Sul, em torno de 0,10 a 0,25 kWh/m²/dia. As demais regiões do estado apresentam uma tendência em subestimar a radiação solar com o viés variando de 0,10 a 0,5 kWh/m²/dia.

A espacialização do Viés do MERRA2 (Figura 32), mostra que este modelo apresenta a tendência de superestimar a base de dados observados, com valores oscilando de 0,2 a 0,96 kWh/m²/dia.

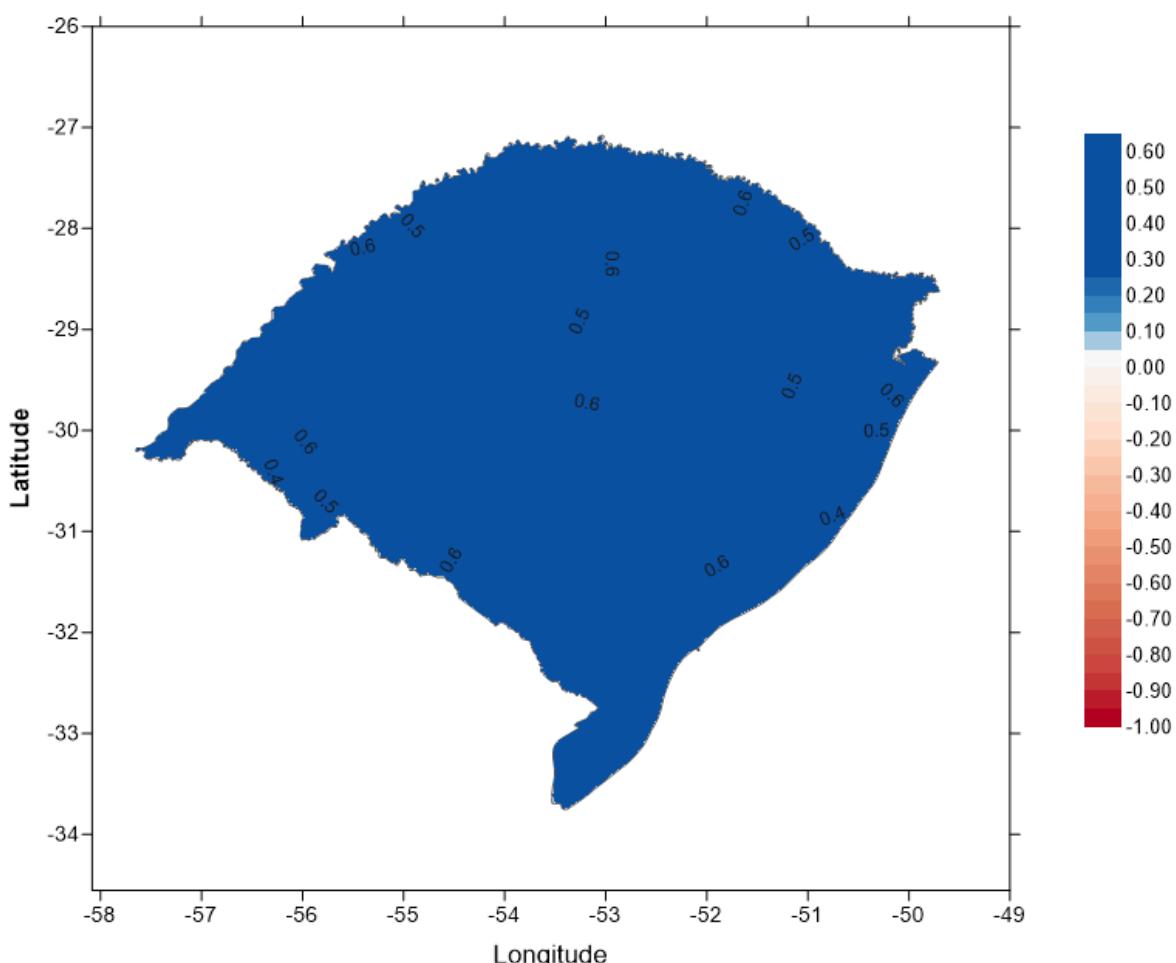


Figura 32. Mapa do Viés calculado a partir dos valores observados e os previstos pelo modelo MERRA2.

Analizando espacialização do Viés do Atlas Brasileiro de Energia Solar (Figura 33), observa-se que ele apresenta a tendência em superestimar a base de dados observados, em grande parte do estado do Rio Grande do Sul com valores oscilando de 0,1 a 0,35 kWh/m²/dia. E nas demais regiões com valores baixos de viés negativo que indica a subestimativa da irradiação solar incidente.

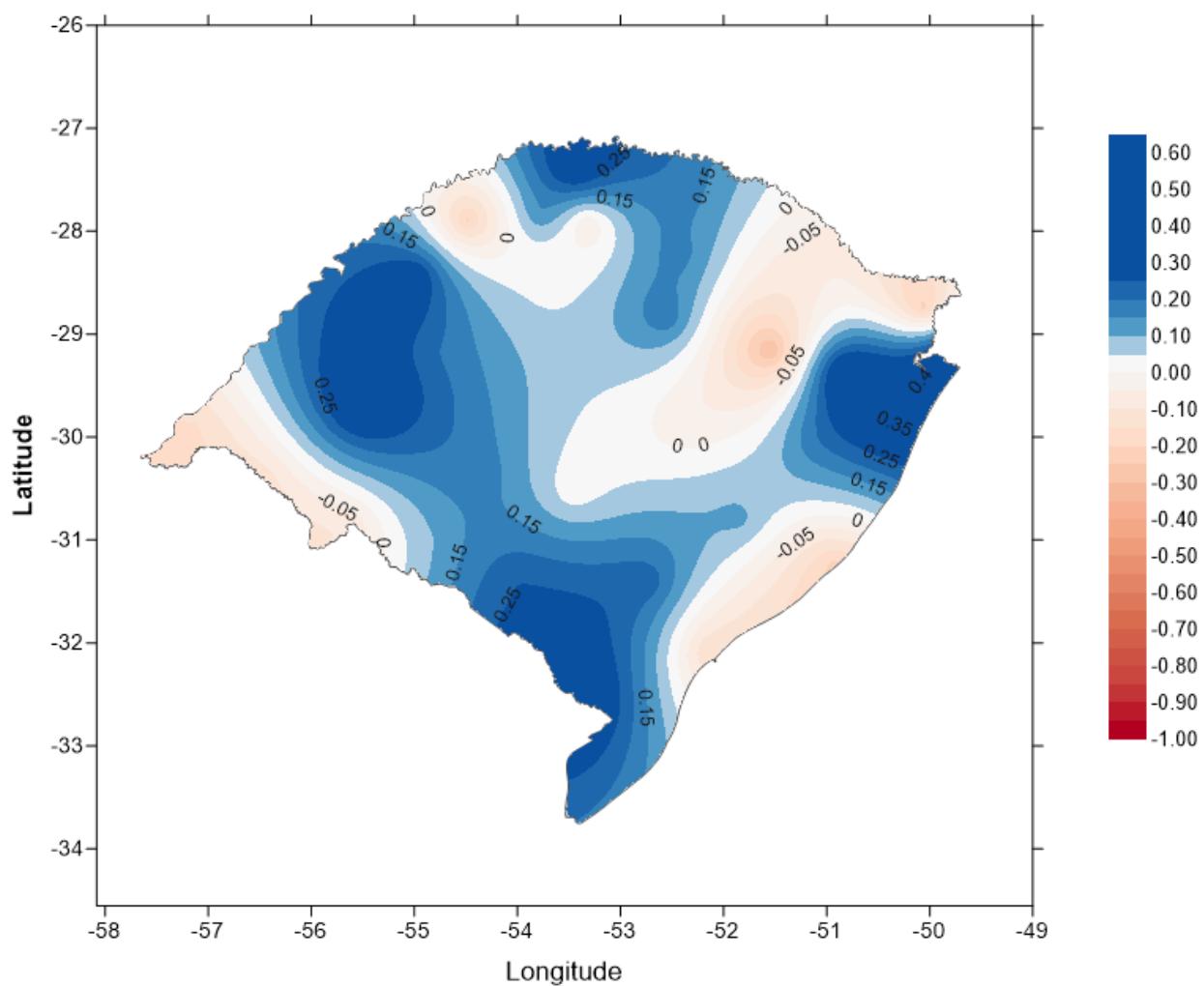


Figura 33. Mapa do Viés calculado a partir dos valores observados e os apresentados no Atlas Brasileiro de Energia Solar.

Analizando o erro médio quadrático (MSE) para cada uma das bases alternativas de dados por estação meteorológica, verifica-se que para todas as estações avaliadas o CFSR foi o que apresentou o menor erro comparado as demais bases de dados, seguido do MERRA2 que mostrou um erro médio próximo de 1 kWh/m². Para a estação meteorológica de Soledade, o Atlas Brasileiro apresentou um erro superior a 2 kWh/m², com uma grande discrepância comparado as demais bases de dados (Figura 34).

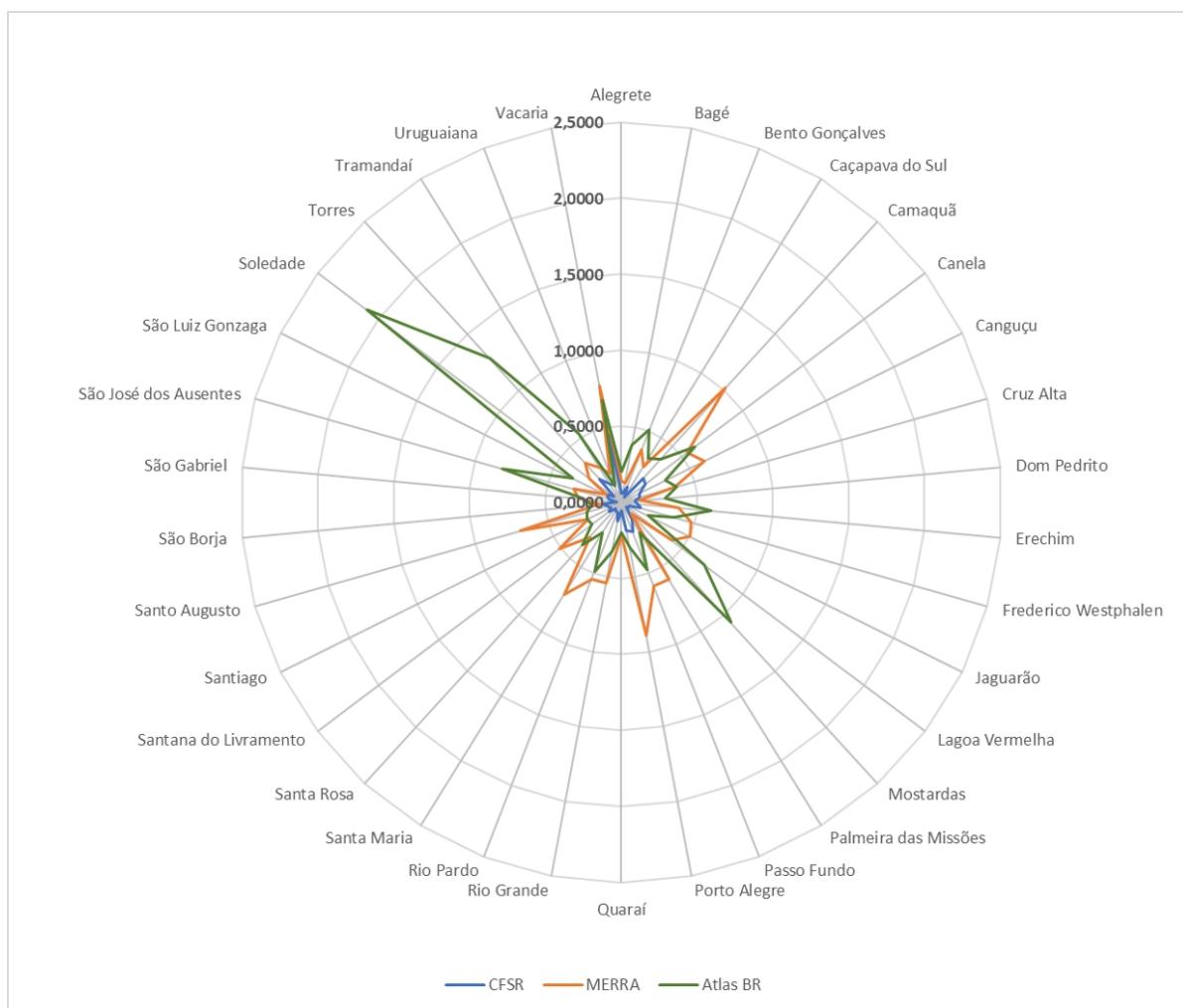


Figura 34. Erro médio quadrático (MSE) nas estações meteorológicas analisadas para as três bases de comparação ao Atlas Solar do Rio Grande do Sul.

Para avaliar o nível de similaridade para os resultados em todas as estações EMAs analisadas e os fornecidos pelos modelos de comparação aos do Atlas Solar do Rio Grande do Sul, utilizamos o Índice de Concordância (IC), que é definido por:

$$IC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Rad_{sim} - Rad_{obs})^2}{\sum_{i=1}^N (|Rad_{sim} - \bar{Rad}_{obs}| + |Rad_{obs} - \bar{Rad}_{obs}|)^2}$$

O Índice de Concordância varia entre 0 e 1, sendo que o valor 1 indica concordância perfeita entre o campo simulado e o observado e o valor 0 mostra concordância nula. A Figura 35 apresenta os *Boxplots* para os valores dos ICs aplicados aos três modelos comparativos.

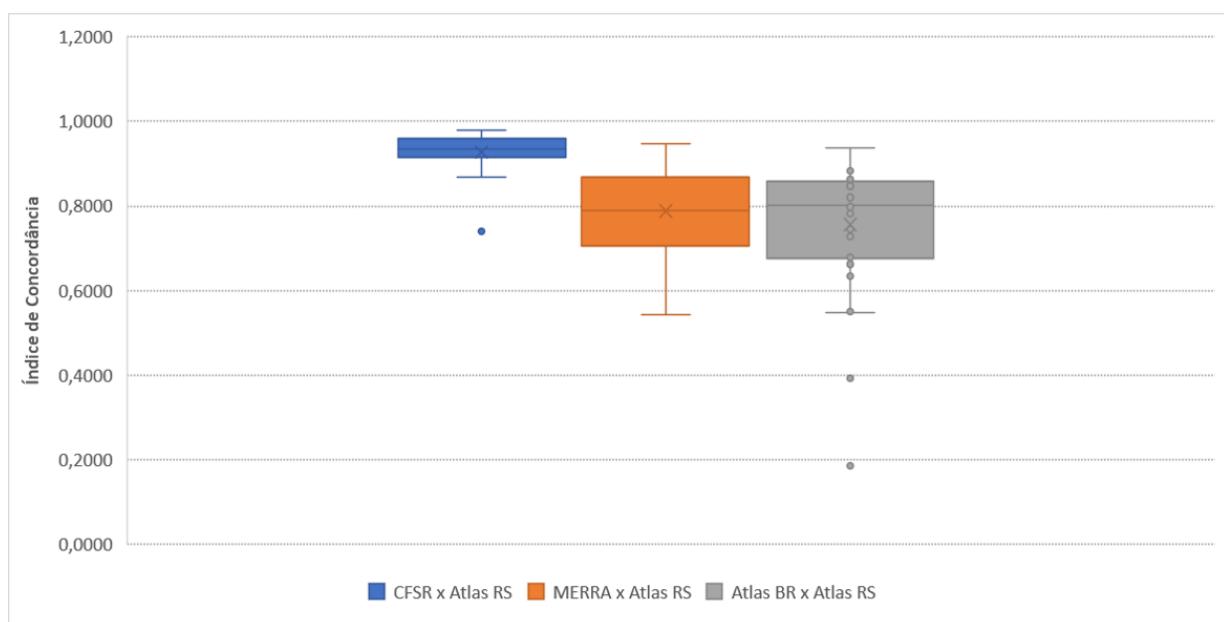


Figura 35. Diagrama *BoxPlot* do Índice de Concordância para os modelos CFSR, MERRA2 e o Atlas Brasileiro de Energia Solar em relação aos valores fornecidos pelo Atlas Solar do Rio Grande do Sul.



Referências Bibliográficas

- Berlato, M. A. 1971. "Radiação Solar no Estado do Rio Grande do Sul". Agronomia Sulriograndense. Porto Alegre. v.5. pp. 115-131.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). <http://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida> Acesso em: 10 ago. 2018.
- Cargnelutti Filho, A., Matzenauer, R. Maluf, J.R.T., Didoné, I. A. Bueno, A. C. Trindade, J. K. Sawasato, J. T., 2007. Radiação Solar Global Decendial no Estado do Rio Grande do Sul: Tabelas de Probabilidades. Série Técnica Fepagro, N. 3, 2007.
- Collares-Pereira, M. e Rabl, A. 1979. "The average distribution of solar radiation fraction correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values", Solar Energy, v. 22, Nº 2. pp. 155-164.
- Colle, S. e Pereira, E. B. 1998. "Atlas de Irradiação Solar do Brasil". LabSolar-UFSC, Florianópolis.
- Duffie, J. A.; Beckman, W. A. Solar engineering of thermal processes. 3.Ed. New York:John Wiley & Sons. 2013.
- Gelaro, Ronald; McCarty, Will; Suárez, Max J.; Todling, Ricardo; Molod, Andrea; e outros 26 autores. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. American Meteorological Society, 15 JULY 2017. 5419-5454.
- GUARNIERI, R. et al. Avaliação de estimativas de radiação solar incidente e baseadas em extração e interpolação na região sudeste do Brasil. Florianópolis (SC): Congresso Brasileiro de Meteorologia (CBMET), 2006.
- Hoyer-Klick, C; Dumortier, D; Tsvetkov, A; Polo, J; J. L. Torres, C. Kurz, and P. Ineichen, 'MESOR Existing Ground Data Sets', D 1.1.2, 2009.
- IBGE – FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E PESQUISA. Estimativas de População. Disponível em ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao. Acesso em: 12 de out. 2018.
- Inman, R. H; Chu, Y; Coimbra, C. F. M. (2016) "Cloud Enhancement of Global Horizontal Irradiance in California and Hawaii," Solar Energy (130) pp. 128–138
- INMET. Nota Técnica No. 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET. Disponível em <http://www.inmet.gov.br/portal/css/content/topo_iframe/pdf/Nota_Tecnica_rede_estacoes_INMET.pdf>. Acesso em: 13 de mai. 2017.
- Journée M, Bertrand C. Quality control of solar radiation data within the RMIB solar measurements network. Solar Energy 2011;85:72-86.

Kessler, M. C. e Corbella, O. D., 1979. "Mapas da Radiação Solar diária total média mensal sobre superfície horizontal para o Rio Grande do Sul para os 12 meses do ano". Atas do 2º Congresso Latino-Americano de Energia Solar. v.1. pp. 61-80. João Pessoa – Paraíba – BR.

Martinazzo, C. A. 2004, Modelos de Estimativa de Radiação Solar para Elaboração de Mapas Solarimétricos, dissertação de Mestrado, PROMEC/UFRGS, julho de 2004.

Martins, F. R. e Pereira, E. B., 2005, relatório disponível na internet no endereço:
http://sonda.ccst.inpe.br/publicacoes/eventos/Workshop_Modelos_CPTEC_2005_FRMartins&EBPereira.pdf

MYERS, D, R. SOLAR RADIATION: Practical Modeling for Renewable Energy Applications. New York: CRC Press, 2013. 199 p.

NASA, National Aeronautics and Space Administration. Disponível em https://www.nasa.gov/mission_pages/station/images/index.html acesso em 10 ago. 2018.

Peraza, D. G., 2013. Estudo de Viabilidade da Instalação de Usinas Fotovoltaicas no Estado do Rio Grande do Sul, dissertação de mestrado PROMEC/ UFRGS.

Peraza, D. G., Gasparin, F. P. e Krenzinger, 2014. A. Estudo de Viabilidade da Instalação de Usinas Solares Fotovoltaicas no Estado do Rio Grande do Sul, V Congresso Brasileiro de Energia Solar – Recife.

Pereira, E. B. Martins, F. R. Abreu, S. L., Ruther, R., 2006. Atlas Brasileiro de Energia Solar, INPE-MCT,São José dos Campos.

Pereira, E. B; Martins, F; Costa, R; Gonçalves, A; Lima, F; Rüther, R; Souza, J. 2017. Atlas Brasileiro de Energia Solar – 2ª Edição. INPE.

Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R. Menicucci, D. , 1987. A New Simplified Version of the Perez Diffuse Irradiance Model For Tilted Surfaces, Solar Energy Vol. 39, No. 3, pp. 221-231

Rampinelli, G. A., 2010. Estudo de Características Elétricas e Térmicas de Inversores para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede. Tese de Doutorado, PROMEC/UFRGS.

Rich H. Inman, Yinghao Chu, Carlos F.M. Coimbra, 2016. "Cloud enhancement of global horizontal irradiance in California and Hawaii", Solar Energy, v. 130, pp. 128-138.

Rienecker, Michele M. et al. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. Journal of climate, v. 24, n. 14, p. 3624-3648, 2011..

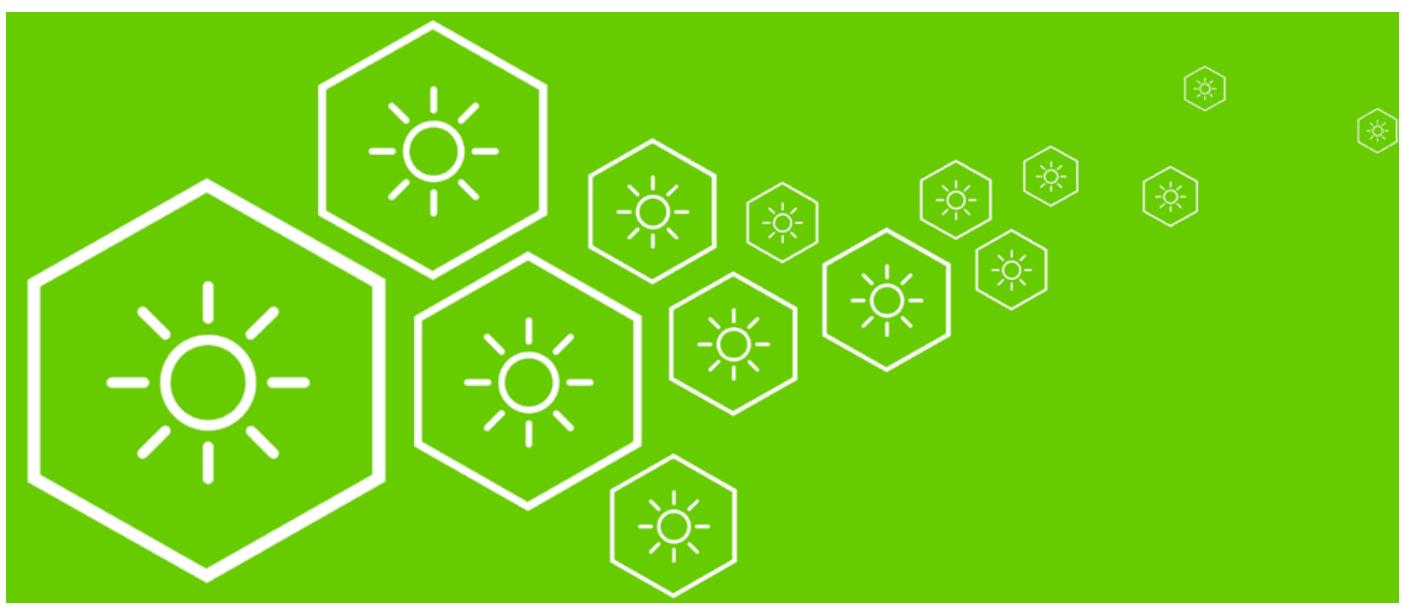


Rossato, M. S. Os climas do Rio Grande do Sul: Variabilidade, tendências e tipologia. Tese de doutorado. UFRGS. PPGEA, 2011.

Ruschel, C.S. e Krenzinger, A., 2016. Estudo da Eficiência de Módulos Fotovoltaicos em Função da Irradiância. Anais do VI Congresso Brasileiro de Energia Solar. Belo Horizonte, ABENS.

Saha, Suranjana et al. The NCEP climate forecast system version 2. Journal of Climate, v. 27, n. 6, p. 2185-2208, 2014.

Tiba, C. e Fraidenraich, N., 2000. "Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de Dados Terrestres", Ed. Universitária da UFPE, Recife.



Figuras

Figura 1. 6

Mapa de localização do Estado do Rio Grande do Sul.

Figura 2.

Incerteza nos dados de irradiância solar obtidos através de modelos de transferência radiativa e satélites e os interpolados a partir de medidas em superfície. Fonte: Pereira et al. 2017

Figura 3. 9

Mapa de isolinhas para a radiação solar no Rio Grande do Sul no mês de novembro. Fonte: adaptado de Kessler e Corbella, 1979.

Figura 4. 10

Mapa de radiação solar global horizontal média anual diária para Rio Grande do Sul. Fonte: adaptado de Martinazzo, 2004.

Figura 5. 11

Prédio do Laboratório de Energia Solar, LABSOL, da UFRGS onde podem ser visto os módulos fotovoltaicos que integram o sistema conectado à rede de 4,8 kWp implantado no ano de 2004. Fonte: LABSOL, UFRGS.

Figura 6. 13

Potência solar fotovoltaica instalada (MW) por Unidade da Federação até fevereiro de 2018. Compilado de ANEEL (2018).

Figura 7. 14

Número acumulado de micro e minigeração distribuída no Rio Grande do Sul desde 2013 segundo o banco de dados da ANEEL em fevereiro de 2018. O valor de 5400 unidades de GD para o final de 2018 é projeção com base na curva de crescimento nos últimos 4 anos. Compilado de ANEEL (2018).

Figura 8. 15

Número de conexões de micro e minigeração distribuída nos municípios do Rio Grande do Sul registradas na ANEEL até agosto de 2017. Compilado de ANEEL (2018).INMET à esquerda e detalhes do piranômetro Eppley modelo PSP à direita. Fonte: INMET e LABSOL – UFRGS.



Figura 9. 15

Potência instalada por município em micro e minigeração distribuída no estado do Rio Grande do Sul. Compilado de ANEEL (2018).

Figura 10. 18

Valores da Irradiância Solar Total (TSI) entre 2000 e 2016. Compilado de NASA: <https://ceres.larc.nasa.gov>.

Figura 11. 19

Variação da radiação solar com incidência normal no topo da atmosfera terrestre ao longo do ano.

Figura 12. 19

Estações do ano para o hemisfério Sul em função da inclinação do eixo de rotação e translação terrestre.

Figura 13. 20

Variação do posicionamento do Sol para na esfera celeste ao longo do ano para a latitude – 30 graus.. Temos a posição do Sol no meio dia solar no primeiro dia de inverno (21 de junho), outono e primavera (21 de março e 22 de setembro, respectivamente) e verão (21 de dezembro).

Figura 14. 21

Valores do fotoperíodo ao longo do ano para localidades na linha do Equador e latitudes 27°, 30° e 33° no hemisfério Sul.

Figura 15. 22

Imagen obtida pela Estação Espacial Internacional revela a pequena espessura da atmosfera terrestre. Fonte: Nasa (2018).

Figura 16. 24

Espessa camada de aerossóis originados nas queimadas do Centro-Oeste e Norte do país sobre a cidade de Porto Alegre no dia 22 de agosto de 2010.

Figura 17. 26

Componentes da irradiância solar antes e após atravessar a atmosfera terrestre.

Figura 18. 28
Estação Meteorológica Automática do INMET básica instalada na cidade de Teutônia, RS.
Fonte: INMET.

Figura 19. 28
Estação Meteorológica Automática do INMET instalada na cidade de Porto Alegre. Fonte: INMET.

Figura 20. 29
Estações Meteorológicas Automáticas do INMET em operação no Rio Grande do Sul. Fonte: INMET.

Figura 21. 30
Montagem típica do medidor de radiação solar numa estação meteorológica automática do INMET à esquerda e detalhes do piranômetro Eppley modelo PSP à direita. Fonte: INMET e LABSOL – UFRGS.

Figura 22. 31
Heliógrafo para medida da insolação e fita de medição de horas de sol pleno durante um dia de céu limpo. Fonte: Adaptado de Wikipedia e IAG-USP.

Figura 23. 32
Actinógrafo para medida da radiação solar global horizontal. Visualiza-se a caneta registradora e o papel milimetrado para impressão do valor instantâneo da radiação solar incidente.. Fonte: Adaptado de WMO.

Figura 24. 33
Instrumentos utilizados para medida da componente difusa da radiação solar. À esquerda montagem de sistema com piranômetro e anel de sombra. À direita piranômetros e sistema de rastreamento com esferas para bloqueio do disco solar. Fonte: Adaptado de Kipp & Zonen.

Figura 25. 34
Estação de radiometria solar da UERGS, unidade Porto Alegre. Esta estação realiza medidas das componentes direta, difusa e global da radiação solar além da obtenção de outros parâmetros meteorológicos. A estação opera de modo autônomo da rede elétrica e disponibiliza todos os dados coletados em tempo real.

Figura 26. 37

Mapa com a localização das estações meteorológicas automáticas (EMAs) do INMET utilizadas para elaboração do Atlas Solar do Rio Grande do Sul.

Figura 27. 41

Percentual de dados válidos e faltantes nas EMAs analisadas.

Figura 28. 44

Valores médios mensais da radiação global horizontal em todo o território do Rio Grande do Sul.

Figura 29. 45

Escala de cores e valores utilizados nos mapas do Atlas Solar do Rio Grande do Sul.

Figura 30. 64

Diagrama resumido da metodologia de validação do Atlas Solar do Rio Grande do Sul.

Figura 31. 66

Mapa do Viés calculado a partir dos valores observados e os previstos pelo modelo CFSR.

Figura 32. 67

Mapa do Viés calculado a partir dos valores observados e os previstos pelo modelo MERRA2.

Figura 33. 68

Mapa do Viés calculado a partir dos valores observados e os apresentados no Atlas Brasileiro de Energia Solar.

Figura 34. 69

Erro médio quadrático (MSE) nas estações meteorológicas analisadas para as três bases de comparação ao Atlas Solar do Rio Grande do Sul.

Figura 35. 70

Diagrama *BoxPlot* do Índice de Concordância para os modelos CFSR, MERRA2 e o Atlas Brasileiro de Energia Solar em relação aos valores fornecidos pelo Atlas Solar do Rio Grande do Sul.

Tabelas

Tabela 1. 39

Valores médios mensais, sazonais e anual para a radiação solar global horizontal nos municípios do estado do Rio Grande do Sul que tiveram as estações EMA do INMET analisadas no Atlas Solar do Rio Grande do Sul. Estes valores correspondem aos dados qualificados e tratados.

Tabela 2. 40

Localização das Estações Meteorológicas Automáticas analisadas e tempo de medição disponível para análises.

Tabela 3. 44

Valores médios, máximos e mínimos para na base de tempo anual, mensal e sazonal para toda a área do Rio Grande do Sul.





ATLAS SOLAR RS

www.atlassolarrs.com



Universidade Estadual do Rio Grande do Sul

P P G A S

Programa de Pós-Graduação em
Ambiente e Sustentabilidade

ISBN 978-85-60231-42-3

