

ATLAS SOLARIMÉTRICO DO ESTADO DO PARANÁ

BARBIERI, Glaucia M Lopes
Sistema Meteorológico do Paraná/ SIMEPAR

COSTA, Angela Beatriz F
Sistema Meteorológico do Paraná/ SIMEPAR

OLIVEIRA, Camila
Universidade Federal do Paraná/ UFPR
Sistema Meteorológico do Paraná/ SIMEPAR

JUSEVICIUS, Marco
Sistema Meteorológico do Paraná/ SIMEPAR

D`ÁVILA, Vanessa Cristina
Sistema Meteorológico do Paraná/ SIMEPAR

RESUMO. A radiação solar é uma fonte de energia no sistema solar, devido à elevada temperatura do Sol, gera uma grande quantidade de energia que é irradiada para o espaço. Ao atravessar a atmosfera terrestre, essa energia é absorvida, refletida ou espalhada, dependendo das partículas e dos gases presentes na atmosfera. Os dados de radiação solar, para este trabalho, foram coletados, no período de 2006 a 2016, em 24 estações meteorológicas automáticas (EMA) do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, 43 estações meteorológicas automáticas do Sistema Meteorológico do Paraná – SIMEPAR e 33 estações meteorológicas convencionais do Instituto Agrônomo do Paraná – IAPAR.

Os métodos de estimativa de dados considerando o aspecto espacial foram: geoestatística utilizando Krigagem e o inverso do quadrado da distância. Apesar de serem usados dois métodos estatísticos, apenas o inverso do quadrado da distância se adaptou, gerando resultados satisfatórios. Nos mapas de radiação solar média mensal, os menores índices de nebulosidade (maior índice de radiação solar) se concentram nas regiões norte, oeste, central e sudoeste. A radiação solar média anual, para o período de 2006 a 2016, mostrou que a região norte tem predominância dos maiores valores de radiação solar durante o ano, seguida das regiões oeste, central e sudoeste. Os menores valores médios anuais, foram observados nas regiões do litoral e leste do Estado.

Palavras-chaves: Radiação Solar, Potencial de energia solar

ABSTRACT: Solar radiation is a source of energy in the solar system because of the high temperature of the Sun, it generates a large amount of energy that is radiated into space. When passing through the Earth's atmosphere, this energy is absorbed, reflected or scattered, depending on the particles and gases present in the atmosphere. The solar radiation data for this work were collected from 2006 to 2016, with 24 automatic meteorological stations (EMA) of the National Institute of Meteorology (INMET), 43 automatic meteorological stations of the Paraná Meteorological System (SIMEPAR) and 33 stations meteorology of the Agronomic Institute of Paraná - IAPAR. The methods of estimation of data considering the spatial aspect were: geostatistics using Kriging and the inverse of the square of the distance. Although two statistical methods are used, only the inverse of the square of the distance has adapted, generating satisfactory results. In the monthly average solar radiation maps, the lowest indices of cloudiness (highest solar radiation index) are concentrated in the north, west, central and southwest regions. The average annual solar radiation for the period from 2006 to 2016 showed that the northern region has the highest solar radiation values during the year, followed by the west, central and southwest regions. The lowest annual mean values were observed in the coastal and eastern regions of the State.

Key words: Solar radiation, Solar energy potential

1. INTRODUÇÃO

A radiação solar é uma fonte de energia no sistema solar, devido à elevada temperatura do Sol, gera uma grande quantidade de energia que é irradiada para o espaço. Ao atravessar a atmosfera terrestre, essa energia é absorvida, refletida ou espalhada, dependendo das partículas e dos gases presentes na atmosfera.

Nos constituintes da atmosfera (composição química e concentração de gases e partículas de aerossol, quantidade e características das nuvens) que interagem com a radiação eletromagnética podem afetar o perfil de temperatura e, por conseguinte, o perfil de pressão. A alteração da distribuição vertical e horizontal da pressão atmosférica afeta a velocidade e a direção do vento.

Os gases apresentam capacidades de absorção variáveis em relação ao comprimento de onda da energia solar incidente no sistema Terra-atmosfera e da energia emitida pela superfície terrestre. Existem regiões do espectro eletromagnético para as quais a atmosfera absorve energia incidente, minimizando a intensidade de radiação solar que chega à superfície terrestre. A parcela de radiação solar que passa livremente pela atmosfera é chamada de "Radiação Direta" e incide sobre a superfície terrestre em diferentes ângulos que dependem da posição relativa do Sol a cada momento. A parte dispersa pela atmosfera, refletida pelas nuvens é chamada de "Radiação Difusa". A soma das duas parcelas denomina-se "Radiação Global" e a proporção entre ambas dependerá do clima, altitude e das diversas características atmosféricas que se modificam frequentemente (nebulosidade, presença de vapor d'água, poluição, etc.). Os principais gases absorvedores da radiação solar são vapor de água (H₂O), oxigênio (O₂), ozônio (O₃) e gás carbônico (CO₂) (DUFFIE; BECKMAN, 1991).

Entre as diversas fontes de energia renovável que podem ser aproveitadas, a energia solar é um recurso renovável de baixo impacto socioambiental, com a tendência mundial de se tornar progressivamente atrativa do ponto de vista econômico. Assim, reveste-se de importância fundamental o levantamento do potencial de energia solar do estado do Paraná, visando sua inserção na matriz energética do Estado e do País. A Companhia Paranaense de Energia-COPEL, junto ao Sistema Meteorológico do Paraná – SIMEPAR, atenta à relevância de todos os aspectos envolvidos nessa questão, realizaram o estudo para a determinação do potencial de energia solar do Estado e da localização das melhores incidências de radiação, para a identificação de melhores alternativas de aproveitamento dessa fonte primária de energia e para a inserção dessa energia na matriz energética considerando seus aspectos de sazonalidade, variabilidade e disponibilidade diária, no estado do Paraná.

APLICAÇÕES DA RADIAÇÃO SOLAR

São inúmeras as aplicações resultantes das medições de radiação eletromagnética no sistema Terra-atmosfera. As alterações climáticas do planeta são importantes, monitorar em escalas de tempo maiores que um ano, o seu equilíbrio radiativo, em média, sobre um tempo suficientemente grande, a quantidade de radiação incidente é igual à quantidade de radiação emergente:

$$\epsilon_{in} = \epsilon_{out}$$

Onde:

ϵ_{in} é a irradiância solar incidente no topo da atmosfera;

ϵ_{out} é a irradiância solar refletida tanto pela superfície quanto pela atmosfera, somada à irradiância de onda longa emitida pela superfície e pela atmosfera.

A partir de medições da irradiância solar incidente e refletida ao nível da superfície, é possível determinar o albedo da superfície, que é a razão entre a irradiância refletida pela superfície e a irradiância incidente. O balanço de energia à superfície é uma medição à superfície para determinação dos fluxos de calor latente e sensível.

Neste caso medem-se a irradiância solar global incidente, a refletida pela superfície, a irradiância emitida pela atmosfera em direção à superfície e a irradiância emitida pela superfície.

Dependendo da região espectral, pode-se determinar quantidades relacionadas aos constituintes atmosféricos integrados na coluna vertical como o vapor d'água, aerossol, ozônio, cobertura de nuvens, etc.

Toda a tecnologia do sensoriamento remoto do sistema Terra-atmosfera é baseada em medições de grandezas radiométricas. As aplicações variam de acordo com a região e resolução espectral, a varredura angular do sensor e a resolução espacial.

2. INSTRUMENTOS SOLARIMÉTRICOS

A medição da irradiância solar incidente é a forma mais segura de se caracterizar precisamente o recurso solar em um local ou região, desde que utilizando-se um instrumento adequado e devidamente calibrado. Tais instrumentos são denominados genericamente de radiômetros, e apresentam um nome mais específico dependendo da região espectral. A partir da irradiância medida em vários níveis da atmosfera, desde a superfície até o topo da atmosfera, vários aspectos do sistema Terra-atmosfera podem ser estudado.

2.1 HELIÓGRAFO

O heliógrafo mede a duração da insolação, ou seja, o período de tempo em que a radiação solar direta supera um dado valor de referência. Os raios solares incidem através da esfera de cristal que funciona como uma lente, concentrando os raios solares sobre uma tira de papelão, queimando-a (fio traço). A tira é ajustada conforme a época do ano em um dos vãos da concha metálica, de modo que os raios solares a queimem progressivamente, desde que não haja nuvens capazes de interceptá-las. A posição do eixo da esfera pode ser alterada, adaptando o aparelho a qualquer latitude entre 0° e 70°.

O heliógrafo mede o número de horas de brilho do Sol. Existe um limiar de radiação solar, acima do qual ocorre o enegrecimento por queima fita do heliógrafo. Este limiar apresenta uma variabilidade, dependendo da localização geográfica, do clima e do tipo da fita utilizada. Em geral, o valor do limiar está entre 100 a 200W/m².

O número de horas de insolação (ou simplesmente insolação) é determinado diretamente a partir das fitas queimadas. Com base na insolação pode-se calcular a razão da insolação. A razão da insolação é o quociente entre o número de horas de insolação (n) e o número máximo possível de horas de insolação do referido dia e local (N).

$$r = n/N$$

O número máximo possível de horas de insolação varia com a época do ano e a latitude do local, fornecido por equações Astronômicas ou tabeladas.

2.2 ACTINÓGRAFO

O actinógrafo determina a quantidade de energia que atinge a unidade de superfície em determinado espaço de tempo, normalmente dada em cal.cm⁻²min⁻¹ ou w.m⁻², caso a unidade de tempo seja em segundos (intensidade). É denominada de radiação solar global. Durante a noite, como não existe energia solar, o valor registrado deve ser zero. Durante o dia, o valor máximo de energia oscila entre 1 e 1,8 cm⁻².min⁻¹, dependendo da época do ano, em instrumentos que adotam esta unidade. Em dias completamente limpos, o gráfico assemelha-se a uma parábola.

O cálculo do total de energia que atinge a unidade da área, é determinar a energia média em cm⁻².min⁻¹, e multiplicá-la pelo intervalo de tempo (em minutos) em que houve insolação. O planímetro também pode ser usado, que é o processo de integração de área, por meio da relação área/energia previamente conhecida. Uma caloria = energia necessária para elevar 1 grau centígrado a temperatura a temperatura de um grama de água em qualquer instante à pressão média ao nível do mar. A troca de fase de um grama de água a 20°C requer 585kcal, conhecida como calor latente de evaporação.

2.3 PIRANÔMETRO

Piranômetros são sensores utilizados para realizar a mensuração da radiação, sobre uma superfície plana horizontal. Essa é feita a partir da densidade do fluxo de radiação global,

ou somente direta ou difusa, em comprimentos de ondas, que vão desde o ultravioleta ao infravermelho do espectro eletromagnético. Os piranômetros geram sinais elétricos do tipo analógico, os quais são transformados pelo sistema em unidade de radiação (W/m^2). Os elementos sensores variam de fotodiodos a termopilhas diferenciais

O piranômetro mede a radiação solar global ou a radiação difusa. Para medir a radiação difusa um anteparo especial é acoplado ao piranômetro a fim de evitar que a radiação solar direta atinja o elemento sensível do instrumento. Tem como princípio de funcionamento o diferente aquecimento da superfície branca e preta, detectado por junções termoeletricas. Essas junções produzem uma corrente elétrica, quando submetida à ação da radiação, que é registrada em um potenciômetro ou em totalizador integrador digital.

2.3.1 PIRANÔMETRO FOTOVOLTAICO

O piranômetro fotovoltaico possui como elemento sensor uma célula fotovoltaica, em geral de silício monocristalino. As fotocélulas têm propriedade de produzir uma corrente elétrica quando iluminada, sendo esta corrente, na condição de curto-circuito, proporcional à intensidade da radiação incidente.

A sua utilização é recomendada para integrais diárias de radiação solar total sobre o plano horizontal ou para observar pequenas flutuações da radiação.

2.3.2 PIRANÔMETRO TERMOELÉTRICO

O elemento sensível destes solarímetros é uma pilha termoeletrica, constituída por pares termoeletricos em série. Tais termopares geram uma tensão elétrica proporcional à diferença de temperatura entre suas juntas, as quais se encontram em contato térmico com as placas metálicas que se aquecem de forma distinta, quando iluminadas. Portanto, a diferença de potencial medida na saída do instrumento pode ser relacionada com o nível de radiação incidente.

Atualmente os piranômetros termoeletricos mais utilizados são: Piranômetros com detector pintado de branco e preto, isto é, o receptor apresenta superfícies branca e preta. Nestes instrumentos, as juntas quentes das termopilhas estão em contato com as superfícies negras, altamente absorventes, e as frias em contato com as superfícies brancas, de grande refletividade; Piranômetros com as superfícies receptoras totalmente enegrecidas em contato térmico com as juntas quentes e as frias, associadas a um bloco de metal de grande condutividade térmica, colocada no interior do instrumento, resguardada da radiação solar e tendo, aproximadamente a temperatura do ar. Esses instrumentos podem ser usados para medir radiação em escala diária, horária ou até menor, o que vai depender mais da propagação do equipamento de aquisição de dados associados.

GRANDEZAS RADIOMÉTRICAS

A Radiometria é a ciência e tecnologia de medição de energia eletromagnética radiante. Geralmente se refere simplesmente como a "medição da radiação óptica". A radiometria envolve a medição da energia radiante total emitida pela fonte radiante em cima do espectro óptico inteiro.

As grandezas radiométricas são aquelas usadas na medição de radiação óptica. Abaixo são citadas essas grandezas:

- Fluxo, Intensidade, Irradiância e Radiância (Nomenclatura recomendada pela Organização Meteorológica Mundial – OMM).
- Energia radiante (U): quantidade de energia na forma de radiação (emitida, transferida, absorvida, incidente, etc.), cuja unidade no Sistema Internacional (SI) é J (Joule);
- Fluxo (F): É a potência radiante. Ou seja, é quantidade de energia (U) observada (ou detectada) por unidade de tempo. (Unidade: W, que corresponde a J/s).

$$F = \Delta U / \Delta t$$

- Intensidade radiante de uma fonte (pontual) em uma determinada direção (I): é o quociente entre o fluxo observado associado a um determinado feixe, num dado ponto do espaço, e o ângulo sólido correspondente à origem ou ao destino deste fluxo. Sua unidade é Wsr^{-1} .

- O ângulo sólido Ω é definido como a razão entre a área σ de uma superfície esférica e o quadrado do raio r de tal esfera:

$$\Omega = \sigma/r^2$$

Utiliza-se o esterradiano (sr) como unidade, embora o ângulo sólido seja na realidade uma grandeza adimensional.

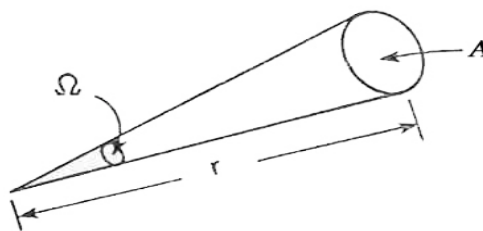


Figura 1 - Ângulo sólido

- Irradiância num certo ponto de uma superfície (ϵ): quociente entre o fluxo de radiação pela área do elemento de superfície, cuja unidade é Wm^{-2} .

$$\epsilon = \Delta U / \Delta t \Delta A$$

- Radiância (L): é uma medida da quantidade de radiação, recebida por um ponto ou emitida por uma fonte, em uma determinada direção.

UNIDADES DE MEDIDA

W (watt) – Unidade de potência.

Ex: Um chuveiro elétrico consome cerca de 5500 W quando ligado.

Wh (watt-hora) – Unidade de energia.

Ex: Uma lâmpada de 100 W ligada por 1 hora consome 100 Wh e se ligada por 30 minutos, 50 Wh.

W/m² (watt por metro quadrado) – Potência recebida por unidade de área.

Ex: No topo da atmosfera terrestre a radiação solar é de 1367 W/m².

Wh/m² (watt-hora por metro quadrado) – Quantidade energia (produzida ou disponível) em um metro quadrado.

Wh/m²-dia ou Wh/m²/dia (watt-hora por metro quadrado por dia). É o total acumulado de energia, recebida em um metro quadrado, durante o período de um dia.

Wh/m²-ano ou Wh/m²/ano (watt-hora por metro quadrado por ano). É o total acumulado de energia, recebida em um metro quadrado, durante o período de um ano.

PREFIXOS

k (kilo) – equivale a 1000 vezes a unidade associada. Ex: 1 kW = 1000W

M (mega) –

equivale a 1.000.000 vezes a unidade associada. Ex: 1 MWh = 1.000.000 Wh

G (giga) – equivale a 1.000.000.000 vezes a unidade associada.

2. METODOLOGIA PARA O PREENCHIMENTO DE FALHAS DOS DADOS

Os dados meteorológicos são obtidos através das estações meteorológicas automáticas ou através das estações meteorológicas convencionais. As estações automáticas operam através de sensores e as convencionais necessitam do observador meteorológico fazer as leituras as 09h00min, 15h00min e 21h00min hrs.

No entanto, problemas diversos podem ocorrer e impedir que o observador realize alguma leitura dos equipamentos, em determinado horário do dia, provocando falhas nos registros dos dados (VENTURA, 2012).

A metodologia utilizada para a identificação dos erros e falhas de dados é um conjunto de regras de validação, que iniciam com simples de restrição de valores, até verificações mais complexas com base nas informações geradas, pelas estações vizinhas, no mesmo período de tempo.

As etapas de validação e consistência alertaram a entrada de dados incorretos, ajudando na identificação de dados suspeitos, aprimorando a qualidade dos mesmos. O sistema de controle de qualidade e validação de dados teve como principal objetivo identificar dados incorretos e/ou dados suspeitos de estarem com problemas.

Os dados foram coletados, analisados e identificados erros ou falhas, com o objetivo de corrigi-los. Segundo Tsukahara et al. (2010), a ausência de registros meteorológicos é um problema frequente na maioria das séries climatológicas brasileiras. Existem vários fatores que podem influenciar na ausência ou no erro de dados de uma estação meteorológica, dentre elas as falhas nos sensores, a calibração dos equipamentos, as falhas nas transmissões dos dados (telemetria), a manutenção nos sistema e a intervenção de agentes externos.

As ausências ou inconsistências podem gerar dificuldades, dúvidas ou imprecisão na análise dos dados. Atualmente, vários métodos estão sendo estudados com o intuito de obter maior acurácia nas estimativas de dados ausentes ou falhos. Dentre podem ser citados os métodos baseados em estatística e geoestatística (Botelho et al, 2005; Nogueira e Amaral, 2009, Souza et al, 2011; Viola et al. , 2010).

A validação dos dados foi através da verificação de ocorrência de dados inconsistentes. São dados gerados por erros de leituras dos sensores, com problemas de calibração ou com defeitos. Para a validação básica dos dados de radiação solar para o Paraná, adotaram-se os seguintes critérios:

- Validação de limites: verifica se os valores a serem analisados respeitam condições básicas da variável representada, ou seja, se ela representa um valor fisicamente possível de ser obtido. Sob este ponto de vista, os dados válidos podem ser restritos dentro de um limite de valores possíveis. Para o caso da radiação solar no estado do Paraná, os valores encontrados ficaram dentro do intervalo entre 300 W/m^2 e 6000 W/m^2 . Qualquer valor fora desse intervalo pode estar incorreto.

- Validação lógica: muitos dos registros das estações meteorológicas apresentam dados médios, máximos e mínimos referentes ao intervalo de tempo do monitoramento. Estes dados devem respeitar suas condições lógicas básicas. Por exemplo, a temperatura média de um período não pode ser maior que a temperatura máxima ou menor que a temperatura mínima deste mesmo período. Nesse caso, a Regra $Temp_{\text{mínima}} \leq Temp_{\text{média}} \leq Temp_{\text{máxima}}$ deve ser respeitada.

- Validação de limites do período: nesse item foram identificados valores suspeitos de erros, com base na comparação dos valores de um intervalo específico. Foi verificado se os mesmos apresentavam condições físicas possíveis de ocorrer.

- Validação espacial: foram utilizados os dados de várias estações que se encontram próximas espacialmente no sentido de vizinhança, para detectar erros ou valores suspeitos, uma vez que foi assumido o princípio de que existe uma correlação ou padrão de comportamento quanto à distribuição espacial entre as estações mais próximas.

Para fazer esta verificação foram utilizadas técnicas estatísticas, como a correlação de *Pearson* (Lira, 2004), para verificar quais as estações estão correlacionadas umas com as outras; a técnica de regressão linear, para efetuar as estimativas de cada estação; e de testes de intervalo de confiança, a fim de verificar quais valores são significativamente diferentes, das observações das estações vizinhas.

A primeira etapa para utilização desta técnica é a identificação das estações mais próximas. Partindo do princípio que estações mais próximas tem maior probabilidade de ter comportamentos semelhantes, com relação às variáveis tratadas, e para evitar o cálculo de correlação de forma desnecessária, entre estações distantes, restringiu-se o raio de abrangência do cálculo de correlação em 150 km.

4. DADOS UTILIZADOS

4.1 INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET

Os dados diários de radiação solar, no estado do Paraná, nas estações do INMET, são coletados através de piranômetros, sensores acoplados as estações meteorológicas automáticas, que capitam dados de radiação solar, Figura 2. Os equipamentos são designados para medir a radiação solar global e difusa. Na medição da radiação difusa, é usado um anteparo especial acoplado ao piranômetro, para evitar que a radiação solar direta atinja o elemento sensível do instrumento. O piranômetro é do tipo Eppley, tendo como princípio de funcionamento o diferente aquecimento das superfícies branca e preta, detectado por junções termoelétricas. Essas junções produzem uma corrente elétrica quando submetidas à ação da radiação, que é registrada em um totalizador integrador digital.

Os dados de radiação solar foram coletados, no período de 2006 a 2016, em (**KJ/m²**). São 24 estações meteorológicas automáticas (EMA) do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, Tabela 1. Na figura 3, observa-se a distribuição espacial das estações meteorológicas automáticas do INMET no estado do Paraná.

Foram realizadas operações matemáticas, para se padronizar as unidades para W/m^2 . Os dados do INMET, utilizou-se a seguinte operação:

Exemplo:

Dia 04/12/2006 Castro

$(5774 \text{ WJ/m}^2 \times (0,277778)) / 1000 = 1,60 \text{ kWh/m}^2$

O fator de conversão utilizado é **0,277778**. Portanto, os dados foram convertidos em **kWh/m²**.



Figura 2 – Piranômetro termoeletrico

TABELA 1 – Estações meteorológicas automática do INMET

NÚMERO	CÓDIGO	ESTAÇÃO	ALTITUDE (m)	LATITUDE	LONGITUDE	INICIO OPERAÇÃO
1	24474959	Castro	994,00	-24.78695	-49.99927	09/07/2006
2	23385294	Cidade Gaúcha	366,00	-23.35916	-52.93191	11/03/2008
3	26445235	Clevelândia	966,00	-26.41720	-52.34874	15/05/2008
4	25264913	Curitiba	923,00	-25.44869	-49.23060	28/01/2003
5	22375289	Diamante do Norte	368,00	-22.63937	-52.89016	06/03/2008
6	25415305	Dois Vizinhos	546,00	-25.69906	-53.09527	29/03/2007
7	23605449	Foz do Iguaçu General	235,00	-25.36000	-54.29000	15/06/2008
8	26445135	Carneiro	1,01	-26.39847	-51.35367	10/04/2008
9	24115301	Goioerê	452,00	-24.15846	-53.03059	19/10/2006
10	23765018	Ibaiti	693,00	-23.77334	-50.18057	29/02/2008
11	23235338	Icaraíma	381,00	-23.39038	-53.63593	15/11/2006
12	25294819	Ilha Do Mel	4,00	-25.49452	-48.32604	23/03/2007
13	25335105	Inácio Martins	1,21	-25.56788	-51.07795	16/10/2006
14	25005051	Ivaí	804,00	-25.01076	-50.85385	12/07/2006
15	23304956	Joaquim Távora Mal. Candido	513,00	-23.50527	-49.94639	23/11/2006
16	24325101	Rondon	392,00	-24.53330	-54.01925	18/11/2006
17	23245155	Maringá	549,00	-23.40536	-51.93283	21/11/2006
18	25424883	Morretes	50,00	-25.50894	-48.80868	13/03/2008
19	23245034	Nova Fátima	664,00	-23.41528	-50.57774	08/02/2007
20	24265157	Nova Tebas	656,00	-24.43735	-51.96302	20/12/2006
21	22505213	Paranapoema	309,00	-22.65827	-52.13453	03/03/2008
22	23435346	Planalto São Mateus do Sul	399,00	-25.72186	-53.74792	07/11/2007
23	25835036	Sul	780,00	-25.83560	-50.36899	16/04/2011
24	24825020	Ventania	1,09	-24.28039	-50.21015	13/04/2011

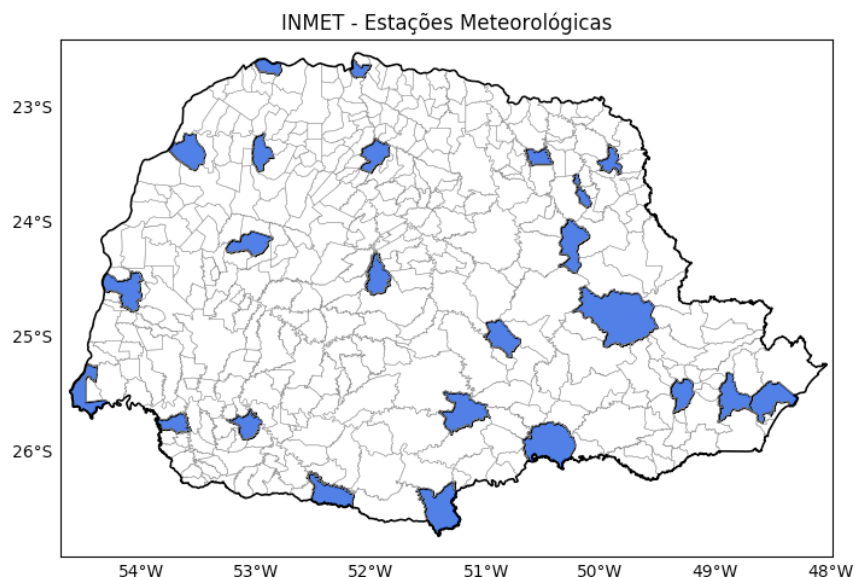


Figura 3 – Mapa de localização das estações meteorológicas do INMET.

4.2 SISTEMA METEOROLÓGICO DO PARANÁ – SIMEPAR

Os dados de radiação solar nas estações automáticas do SIMEPAR foram coletados no período de 1997 a 2016, através de piranômetros LI-200X-L (Campbell Scientific, Inc., USA), Figura 4, em 43 estações meteorológicas automáticas do Sistema Meteorológico do Paraná - SIMEPAR, Tabela 2. Na figura 5, observa-se a distribuição espacial das estações meteorológicas automáticas do SIMEPAR, no estado do Paraná. Para os dados do SIMEPAR, não foi necessário a intervenção de transformações de unidades, pois, os dados se encontravam na **Unidade** = W/m^2 .

Exemplo:

Dia 01/01/2006 Curitiba

$2683 W/m^2 / 1000 = 2,68 kWh/m^2$

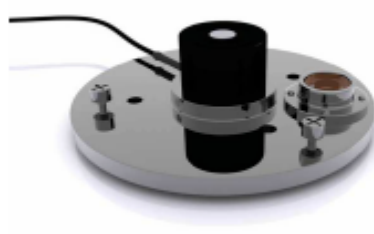


Figura 4 - Piranômetro fotovoltaico

TABELA 2 - Estações meteorológicas automática do SIMEPAR

	CÓDIGO	ESTAÇÃO	ALTITUDE (m)	LATITUDE	LONGITUDE	INICIO OPERAÇÃO
1	25134848	Antonina	60.00	-25.22000	-48.80000	1999-01-01
2	25444869	APPA Antonina	2.00	-25.44716	-48.69434	2014-09-24
3	23515154	Apucarana	746.00	-23.50750	-51.54470	1999-10-01
4	24235332	Assis Chateaubriand	450.00	-24.38860	-53.54110	1999-08-19
5	23005002	Cambará	450.00	-23.00000	-50.03330	1997-06-01
6	24035222	Campo Mourão	601.20	-24.05000	-52.36660	1997-06-01
7	24385115	Cândido de Abreu	645.00	-24.63330	-51.25000	1997-06-01

8	24535333	Cascavel	719.30	-24.88330	-53.55000	1997-06-01
9	24494915	Cerro Azul	366.00	-24.81660	-49.25000	1997-06-01
10	23395232	Cianorte	451.00	-23.65775	-52.54760	2002-04-04
11	25264916	Curitiba	935.00	-25.44817	-49.23033	1997-06-01
12	25335129	Entre Rios	1095.00	-25.55000	-51.48330	2001-01-17
13	25275035	Fernandes Pinheiro	893.00	-25.45000	-50.58330	1998-11-28
14	26055139	Foz do Areia	728.20	-26.08330	-51.65000	1997-06-01
15	25245437	Foz do Iguaçu	232.00	-25.40000	-54.61670	1997-07-19
16	26055305	Francisco Beltrão	652.00	-26.05930	-53.05080	2010-09-02
17	24045415	Guaíra	227.90	-24.06670	-54.25000	1997-07-24
18	25215130	Guarapuava	1070.00	-25.35000	-51.50000	1997-06-01
19	25324831	Guaratuba	0.00	-25.84520	-48.57610	1997-06-01
20	24134940	Jaguariaíva	900.00	-24.22690	-49.67700	2000-04-07
21	25474946	Lapa	909.80	-25.78330	-49.76660	1997-06-01
22	23185109	Londrina	585.00	-23.30000	-51.15000	1997-06-01
23	23275159	Maringá	570.00	-23.45000	-51.98330	1998-10-04
24	22222222	Móvel [Matinhos]	1.00	-25.83883	-48.53791	2011-12-27
25	25345331	N.Prata do Iguaçu	546.30	-25.56660	-53.51660	1997-06-01
26	26285158	Palmas	1100.00	-26.46670	-51.96670	1998-04-28
27	24535213	Palmital	783.00	-24.88330	-52.21660	1997-06-01
28	24185355	Palotina	303.00	-24.30000	-53.91660	1997-06-01
29	25534852	Paranaguá	19.00	-25.53736	-48.52928	2012-11-21
30	23055226	Paranavaí	480.00	-23.08330	-52.43330	1997-06-01
31	26075241	Pato Branco	721.80	-26.11660	-52.68330	1997-06-01
32	25254905	Pinhais	930.00	-25.41670	-49.13330	1998-07-10
33	25385157	Pinhão	910.00	-25.64944	-51.96250	2003-04-08
34	25135001	Ponta Grossa	888.25	-25.01329	-50.15198	1997-06-01
35	25174828	Reserva Natural Salto Morato	32.00	-25.17790	-48.28810	2011-03-24
36	25315329	Salto Caxias	440.00	-25.51660	-53.48330	1998-10-24
37	25315301	Salto Osorio	514.00	-25.51670	-53.01670	1999-07-22
38	24505420	Santa Helena	271.00	-24.91680	-54.31030	1997-07-21
39	25115408	São Miguel do Iguaçu	298.00	-25.35280	-54.25460	1997-06-01
40	24205037	Telêmaco Borba	768.00	-24.33330	-50.61660	1997-06-01
41	24475343	Toledo	516.40	-24.78330	-53.71670	1997-07-23
42	23445317	Umuarama	480.00	-23.73330	-53.28330	1997-06-01
43	26145103	União da Vitória	756.53	-26.23330	-51.06660	1997-06-01

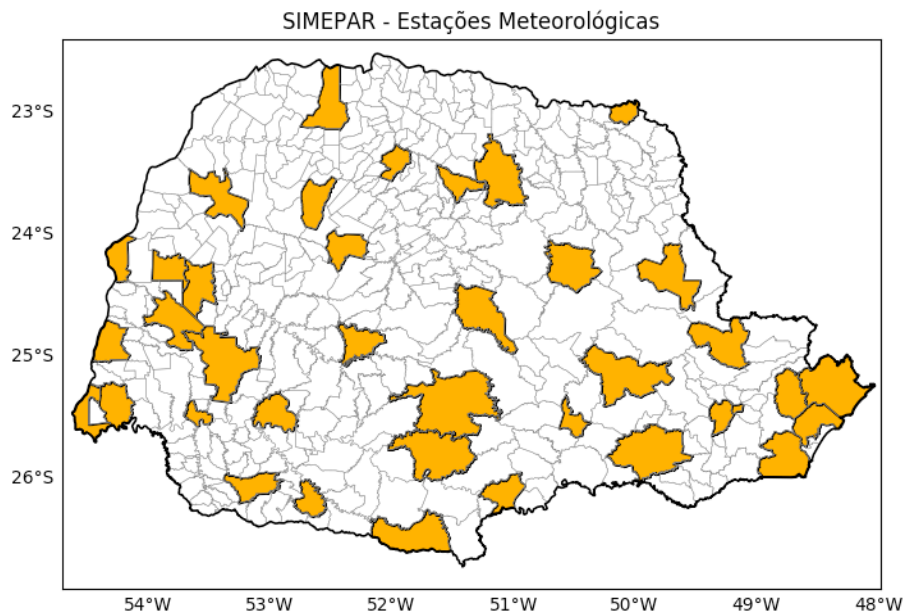


Figura 5 - Mapa de localização das estações meteorológicas automáticas do SIMEPAR.

4.3 INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ – IAPAR

Os dados da insolação diária foram coletados, no período de 1971 a 2016, através do heliógrafo do tipo Campbell-Stokes, Figura 6, em 33 estações meteorológicas convencionais do Instituto Agrônomo do Paraná – IAPAR, Tabela 3. Nesse caso, foi preciso utilizar, métodos matemáticos, para se obter dados de radiação solar, pois, os dados coletados nas estações do IAPAR, são de insolação.

A insolação diária é o número de horas de brilho solar. A convergência dos raios solares sobre uma faixa de papel queima ao longo do dia. As informações são utilizadas para quantificar as horas de brilho do Sol. A queima ocorre quando a radiação solar direta supera um limiar variável de 100 a 200 W/m² que depende da localização geográfica do equipamento, do clima e do tipo da faixa de papel utilizada para o registro. Quando o equipamento está adequadamente instalado, com a utilização de faixa de papel apropriado, o limiar é igual a 120 W/m². Mediante o uso de correlações simples, com coeficientes apropriados, as séries históricas da insolação podem ser utilizadas para estimar radiação solar diária, média mensal ou anual, com erros mínimos da ordem de 10%.

Na Figura 7, observa-se a distribuição espacial das estações meteorológicas do IAPAR no estado do Paraná.

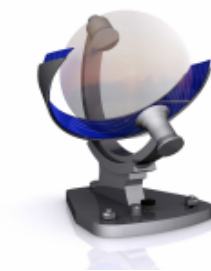


Figura 6 – Heliógrafo do tipo Campbell-Stokes.

Para se obter os dados de radiação solar, através da variável insolação utilizou-se a seguinte metodologia:

A relação entre a insolação diária e a radiação solar global diária, média mensal, é a conhecida relação de Angstrom (1924). A expressão é apresentada da seguinte forma na equação 1:

$$Q_g = Q_o (a + b n/N) \quad (1)$$

Onde:

Q_o e Q_g = radiação solar global diária e a radiação solar global diária no topo da atmosfera, médias mensais;

n = insolação diária;

N = duração astronômica do dia;

a e b = parâmetro de regressão.

Usando a equação de Angstrom:

Fator de conversão = 0,041868 MJ/m²*dia

Exemplo:

Dia 01/01/2006 Londrina

(12,4 MJ/m². day x 0,277778) = 3,43 kwh/m²

O fator de conversão utilizado é **0,277778**. Portanto, os dados foram convertidos em **kWh/m²**.

TABELA 3 - Estações meteorológicas convencional do IAPAR

	CÓDIGO	ESTAÇÃO	ALTITUDE (m)	LATITUDE	LONGITUDE	INÍCIO OPERAÇÃO
1	2548070	Antonina	60,00	-25.13	-48.48	nov/77
2	2351008	Apucarana	746,00	-23.30	-51.32	ago/61
3	2350018	Bandeirantes	440,00	-23.06	-50.21	abr/74
4	2251027	Bela V. Paraiso	600,00	-22.51	-51.12	out/71
5	2350017	Cambara	450,00	-23.00	-50.02	jun/71
6	2451052	Candido De Abreu	645,00	-24.38	-51.15	jul/88
7	2453023	Cascavel	660,00	-24.53	-53.33	ago/89
8	2449013	Cerro Azul	360,00	-24.49	-49.15	mar/72
9	2352019	Cianorte	530,00	-23.40	-52.35	set/71
10	2652003	Clevelândia	930,00	-26.25	-52.21	set/72
11	2550025	Fernandes Pinheiro	893,00	-25.27	-50.35	jan/63
12	2653012	Francisco Beltrão	650,00	-26.5	-53.04	mai/73
13	2551010	Guarapuava	1058,00	-25.21	-51.30	jun/72
14	2548039	Guaraqueçaba	40,00	-25.16	-48.32	nov/77
15	2351011	Ibiporã	484,00	-23.16	-51.01	nov/71
16	2349030	Joaquim Távora	512,00	-23.30	-49.57	jun/71
17	2549091	Lapa	910,00	-25.47	-49.46	set/88
18	2351003	Londrina	585,00	-23.22	-51.10	jan/76
19	2554037	Medianeira	426,00	-25.18	-54.07	mai/03
20	2548038	Morretes	59,00	-25.30	-48.49	out/78
21	2548038	Morretes	10,00	-25.30	-48.49	jan/66
22	2452050	Nova Cantu	540,00	-24.40	-52.34	ago/72
23	2651043	Palmas	1100,00	-26.29	-51.59	dez/78
24	2453003	Palotina	310,00	-24.18	-53.55	ago/72
25	2352017	Paranavaí	480,00	-23.05	-52.26	jul/71
26	2652035	Pato Branco	700,00	-26.07	-52.41	dez/78
27	2549041	Pinhais	930,00	-25.25	-49.08	fev/70
28	2553015	Planalto	400,00	-25.42	-53.47	mar/73
29	2550024	Ponta Grossa	880,00	-25.13	-50.01	jan/54
30	2553018	Quedas Do Iguaçu	513,00	-25.31	-53.01	jun/72
31	2554026	São Miguel Iguaçu	260,00	-25.26	-54.22	ago/82
32	2450011	Telêmaco Borba	768,00	-24.20	-50.37	nov/71
33	2353008	Umuarama	480,00	-23.44	53.17	nov/71

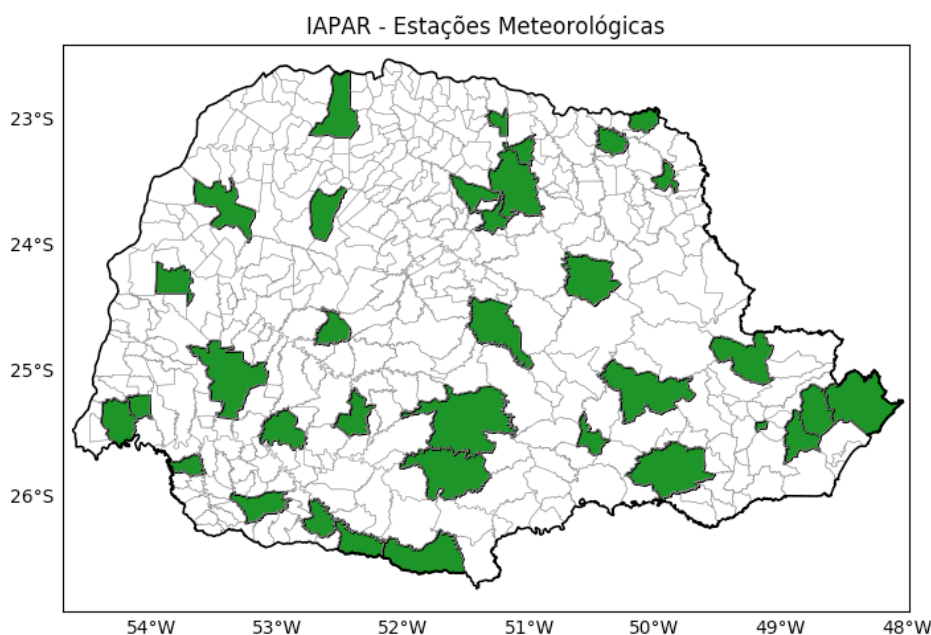


Figura 7 - Mapa de localização das estações meteorológicas do IAPAR.

Com os dados de radiação solar dos 3 órgãos de pesquisas (INMET, SIMEPAR e IAPAR) foram efetuados os seguintes procedimentos: gráficos de:

- ❖ Média mensal
- ❖ Média sazonal
 - **VERÃO** = dezembro, janeiro, fevereiro;
 - **OUTONO** = março, abril, maio;
 - **INVERNO** = junho, julho, agosto;
 - **PRIMAVERA** = setembro, outubro, novembro.
- ❖ Média anual.

5. METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DOS DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR PARA O ESTADO DO PARANÁ

A energia solar sofre influência do local tais como: o clima, relevo, vegetação e latitude, entre outras. Porém, não é possível se ter medidas das variáveis em cada local que possa apresentar uma diferença significativa nos valores, tornando necessário recorrer a métodos matemáticos de interpolação.

A interpolação é um procedimento que permite construir um novo conjunto de dados a partir de um conjunto discreto de dados pontuais conhecidos, ou seja, trata-se de um método que possibilita proceder à reconstituição (aproximada) de uma função apenas conhecendo algumas das suas abscissas e respectivas ordenadas (imagens). Assim, a interpolação constitui-se num método de estimar um parâmetro para o qual não existe informação disponível, considerando-se que os pontos próximos no espaço tendem a ter valores mais semelhantes do que pontos mais afastados. Isso significa que, a partir de alguns pontos, com valores medidos, sobre um território, é possível interpolar e preencher todo o espaço restante com dados estimados.

Existem vários métodos de interpolação, que se dividem de acordo com o tipo e a quantidade de dados da amostra, a extensão da área a ser estudada, a sua dispersão no espaço e o número de variáveis envolvidas no problema. Com relação à quantidade de dados da amostra e à extensão da área estudada, os métodos de interpolação podem ser classificados em global e local (BURROUGH e MCDONNELL, 1998). Na interpolação global são utilizados todos os dados disponíveis para fazer previsões para toda a área de interesse do problema, enquanto que a interpolação local trabalha apenas uma área reduzida ao redor dos dados a serem interpolados, gerando estimativas apenas para a vizinhança. Segundo Burrough e McDonnell (1998), alguns exemplos de métodos globais são: superfícies de tendência, modelos de regressão e análise espectral. Já os métodos locais mais conhecidos

são: "vizinho mais próximo" (polígonos de Thiessen), inverso do quadrado da distância (IDD) e splines.

Os métodos de estimativa de dados considerando o aspecto espacial foram: geostatística utilizando Krigagem e o inverso do quadrado da distância.

Os métodos empregam a distância entre os pontos, para determinar o valor do ponderador, o qual posteriormente foi utilizado em conjunto com o valor observado nas estações, gerando o valor estimado para um determinado ponto. Apesar de serem usados dois métodos estatísticos, apenas um método se adaptou, gerando resultados satisfatórios.

5.1 Método Krigagem

A Krigagem é uma metodologia de interpolação de dados. Esse método utiliza o dado tabular e sua posição geográfica para calcular as interpolações. É utilizado o princípio da Primeira Lei de Geografia de Tobler, onde as unidades de análise mais próximas entre si são mais parecidas do que unidades mais afastadas. A krigagem utiliza funções matemáticas para acrescentar pesos maiores nas posições mais próximas aos pontos amostrais e pesos menores nas posições mais distantes, e assim cria novos pontos interpolados com base nas combinações lineares de dados.

A partir de gráficos como o (semi) variograma, a superfície contínua de dados é criada, e pode-se ter uma ideia da segregação espacial das variáveis, e o alcance da segregação no espaço, em unidades métricas conhecidas, como milhas, quilômetros, etc.

Nesse trabalho, o método de Krigagem, não se adaptou bem, devido a quantidade de dados observados, ou seja, quando são muitos dados, os métodos de interpolação, geram valores semelhantes. No caso de dados esparsos, alguns métodos possuem limitações na representação da variabilidade espacial, pois desconsideram a anisotropia e a continuidade do fenômeno a ser observado.

5.2 Método do Inverso do Quadrado da Distância (Idd) e Aplicação.

O inverso do quadrado da distância é um método determinístico para estimação ou interpolação de dados proposto por Shepard (1968) e pressupõe que quanto mais distante um local observado estiver do estimado menor será seu peso, isto é, menor será sua influência sobre o valor interpolado. Sua expressão usual é dada por:

$$F(x,y) = \sum_{K=1}^N W(x_k,y_k)F(x_k,y_k) \quad (2)$$

em que $F(x,y)$ é o valor interpolado para a coordenada (x,y) , N é o número de pontos observados na vizinhança do local interpolado, $F(x_k,y_k)$ é o valor observado no ponto k e $W(x_k,y_k)$ são os pesos atribuídos a cada uma das localidades. A expressão para determinar a função peso é a seguinte:

$$W(x_k,y_k) = \frac{d_k(x,y)^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_k(x,y)^{-p}} \quad (3)$$

Onde a quantidade $d_k(x,y) = ((x - x_k)^2 + (y - y_k)^2)^{1/2}$ é a distância entre a coordenada interpolada (x,y) e cada um dos locais observados (x_k,y_k) (a distância pode ser obtida utilizando o sistema de coordenadas esféricas) e $\sum_{k=1}^N W(x_k,y_k) = 1$. Observe que, ao passo que a distancia aumenta os pesos diminuem potencialmente. Assim, quando o parâmetro p aumenta, menor será a influência dos pontos mais distantes sobre o interpolado. Inversamente, quanto menor for o valor de p , maior será a influência dos pontos mais próximos.

Observe ainda que, se $p = 0$ não há diminuição ou aumento do peso com a distância pois cada λ_i terá a mesma influência sobre os valores interpolados; se $p = 1$, esta é uma simples interpolação linear entre os pontos; se $p = 2$, haverá uma forte influência para pontos mais próximos e uma leve influência para pontos mais distantes (LU; WONG, 2008).

Baseado na estrutura da expressão do IDW, a escolha do peso p (Equação 2) pode afetar significativamente o resultado da interpolação. A comparação de pesos específicos pode ser encontrado nos trabalhos de Kravchenko e Bullock (1999), Cecílio e Pruski (2003) e VICENTE-SERRANO et al. (2003).

O método do inverso do quadrado da distância é caracterizado pelo fato de ser um interpolador exato e pela geração de *bull's eyes* (também conhecido como efeito de mira) que ocorrem na forma de círculos concêntricos ao redor dos pontos de amostragem (BAKKALI; AMRANI, 2008), os quais se devem a função peso (Equação 3). Contudo, um parâmetro de suavização pode ser atribuído ao IDW para reduzir o efeito de mira e suavizar a superfície interpolada (TOMCZAK, 1998).

5.3 Linguagem Computacional Utilizada

As operações matemáticas dos métodos estatísticos utilizados para a estimativa da radiação solar foram desenvolvidas na linguagem de programação Python.

O Python é uma linguagem de altíssimo nível, orientada a objeto, de tipagem dinâmica e forte, interpretada e interativa (BORGES, 2010). Possui uma sintaxe clara e concisa, que favorece a legibilidade do código fonte, tornando a linguagem uma das mais populares para computação científica.

O Python possui uma vasta biblioteca de módulos e pacotes que é distribuída com o interpretador. Existem também disponíveis muitas bibliotecas escritas por terceiros, que implementam diversos recursos além da biblioteca padrão (BORGES, 2010).

5.4 Estimativa de Radiação Solar por Modelagem Numérica

Os modelos numéricos têm sido frequentemente utilizados para a simulação das condições atmosféricas passadas e também para prognósticos futuros. Geralmente, as variáveis atmosféricas são representadas em pontos de grade horizontais e verticais. Variáveis, tais como temperatura, fluxos de energia e precipitação. São calculadas ao nível do solo enquanto as demais, como vento, umidade relativa, fração de cobertura de nuvens são calculadas ao longo de uma coluna vertical para cada caixa de grade, todas essas grandezas calculadas para uma caixa de grade influenciam na estimativa de caixas vizinhas.

Para estimar o fluxo de radiação solar na superfície, os modelos utilizam parametrizações que simulam esses processos físicos na atmosfera. As parametrizações baseiam-se em dados coletados em superfície ou por satélites que permitem inferir as propriedades óticas da atmosfera e, portanto, a contribuição de cada processo radiativo na transmitância atmosférica total da radiação solar. Tais modelos podem ser classificados em estatísticos e físicos. Os modelos estatísticos utilizam formulações empíricas entre medidas de radiação incidente na superfície e condições atmosféricas locais e, geralmente, apresentam validade restrita à região estudada. Já os modelos físicos são válidos para qualquer região uma vez que solucionam a equação de transferência radiativa que descreve matematicamente os processos físicos que ocorrem na atmosfera. A principal dificuldade da aplicação de modelos físicos reside na obtenção dos dados necessários para a parametrização das interações entre a radiação solar e os constituintes atmosféricos. Entre esses dados pode-se citar a cobertura de nuvens e o perfil dos constituintes atmosféricos como aerossóis, vapor d'água, ozônio e outros gases atmosféricos.

5.5 Estimativa de Radiação Solar por satélite

O sensoriamento remoto provê inigualáveis coberturas espaciais e temporais de atributos da superfície, assim sendo, vários estudos tentam estimar o saldo de radiação solar por combinação de observações de sensoriamento remoto com dados de superfície e da atmosfera (JACOBS et al., 2000; MA et al., 2002).

O uso de imagens orbitais é conhecido pelo baixo custo de seus produtos, quando comparado com tradicionais métodos fotogramétricos e topográficos. Outra vantagem apresentada por esta tecnologia é a frequência com que cada região na superfície da terra é coberta, o que possibilita o monitoramento temporal de diferentes fenômenos e recursos naturais. As novas gerações de satélites estão produzindo dados com alta resolução espacial,

levando a tecnologia do sensoriamento remoto para ser aplicada numa variedade de áreas do conhecimento e enfatizando a necessidade de formas automáticas para o processamento e análise de imagens.

Os sistemas de sensoriamento remoto disponíveis atualmente fornecem dados repetitivos e da superfície da Terra, os quais são de grande utilidade para diversas aplicações, dentre elas: geologia, oceanografia, cartografia, hidrologia, e etc.

As informações derivadas de sensores remotos podem também ser utilizadas para alimentar e/ou validar modelos numéricos tais como modelos globais, desenvolvidos para simular os processos ambientais ou fazer previsões de mudanças derivadas de ação antrópica.

A busca por fontes renováveis de energia de baixo impacto ambiental vem impulsionando o desenvolvimento tecnológico e viabilizando economicamente o uso da energia solar (Martins & Pereira, 2011), tendo em vista a perspectiva de redução futura das fontes tradicionais e as preocupações com o meio ambiente (Pereira et al. 2006).

No Brasil, apesar das condições climáticas favoráveis, o aproveitamento dessa fonte de energia é muito reduzido. Enquanto 0,9% das residências brasileiras utilizam painéis de aquecimento solar, em Israel, 94% das residências fazem uso dessa tecnologia (Carvalho, 2010). As dimensões territoriais brasileiras constituem em elemento de dificuldade para a espacialização da radiação solar no país e o conhecimento do potencial de uso desse recurso energético. O uso de sensores terrestres (radiômetros) é dificultado pelo alto custo de aquisição e manutenção desses equipamentos, perdas de calibração, falhas na coleta das informações e erros ocasionados pela necessidade do uso de interpolação dos dados em grandes distâncias. Nesse caso, o uso de sensores orbitais passa a ter grande relevância, por permitir um maior detalhamento da variabilidade espacial da radiação solar incidente em grandes áreas, tendo os sensores terrestres, a função de validação dos resultados obtidos de modelos.

É importante lembrar que não há um método de interpolação que pode ser aplicado à qualquer situação. Alguns são mais exatos e úteis que outros, mas demoram muito para realizar o cálculo. Todos têm suas vantagens e desvantagens. Na prática, a escolha de um método particular de interpolação dependerá da qualidade dos dados amostrais, do tipo de superfície que será gerada e a tolerância aos erros estimados. Geralmente, um procedimento de três passos é recomendado: Avaliar os dados da amostra; aplicar um método de interpolação que é mais adequado para ambos, os dados da amostra e os objetivos do estudo. Se possível use vários métodos disponíveis; compare resultados e encontre o melhor resultado e o método mais adequado.

Na questão da estimativa de variáveis meteorológicas por satélites, tem-se, através do avanço de novas tecnologias a possibilidade de monitorar grandes áreas continentais em tempo real por uma fração do custo de uma rede de superfícies de radares ou estações meteorológicas de densidade equivalente. No entanto, deve ser levado em consideração que as vantagens oferecidas pelo uso de satélites no monitoramento das variáveis meteorológicas, são prejudicadas pelas desvantagens associadas à forma indireta com que as medidas remotas são feitas, o que sinaliza a necessidade de se dispor de uma rede convencional de boa qualidade, mínima que seja.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os mapas de radiação solar média mensal elaborado neste projeto mostraram, que esta grandeza sobre o estado do Paraná, variou de 2,5 a aproximadamente 7 KWh/m². A análise dos mapas revelou uma forte variabilidade espacial e temporal, que reflete no ciclo sazonal das regiões do Estado. A variabilidade espacial da radiação solar responde ao regime de nebulosidade de cada região, uma vez que, para uma mesma latitude e data, a radiação solar na faixa de longitude que abrange o Paraná (único fuso horário), depende muito pouco da longitude (PRATES et al, 2002). Durante os meses de novembro, dezembro e janeiro, observou-se, valores altos de radiação solar, período de maior incidência de radiação solar sobre o Estado, principalmente nas regiões norte, oeste, sudoeste e parte da região central paranaense. Ao comparar os resultados com os obtidos por Prates et al, 2002, para o estado do Paraná, foram encontrados valores mais baixos de radiação solar na região do Litoral em relação as outras regiões do estado, porém na regiões oeste observou-se os maiores valores.

As regiões leste, sul e parte dos Campos Gerais (principalmente a região leste), sofrem influência da umidade do oceano Atlântico, transportada pelos ventos dos quadrantes leste e

sudeste, juntamente com a localização da Serra do Mar, deixando essas regiões com muita nebulosidade em grande parte dos dias do ano.

Nas Figuras 8, 9 e 10, verifica-se que nos meses de novembro, dezembro e janeiro os valores de radiação solar variaram de 6,0 a 6,5 KWh/m².

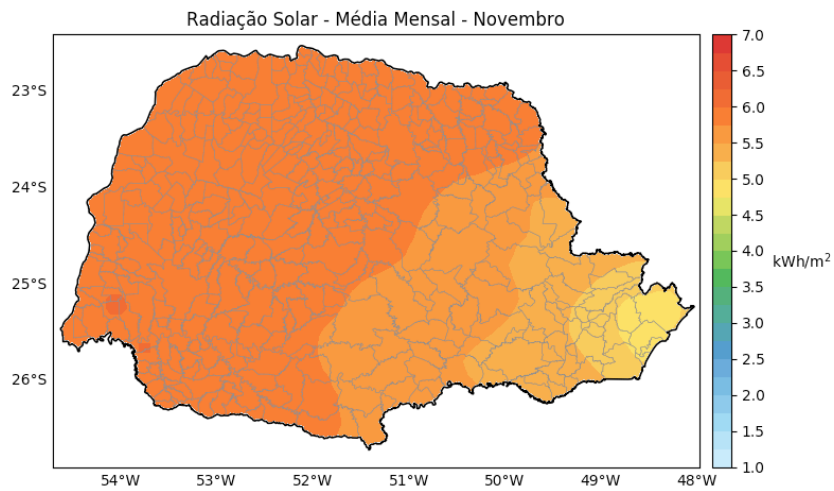


Figura 8 - Radiação solar média mensal – Mês de Novembro.

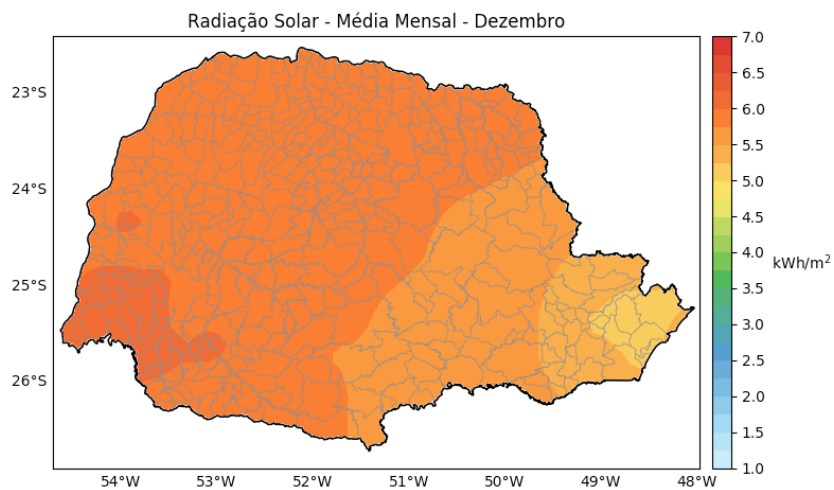


Figura 9 - Radiação solar média mensal – Mês de Dezembro.

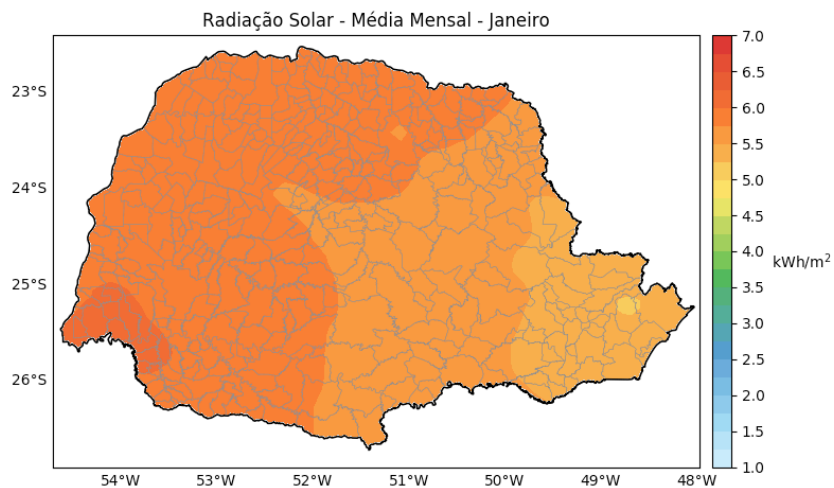


Figura 10 - Radiação solar média mensal – Mês de Janeiro.

Nas Figuras 11, 12 e 13, observa-se que nos meses de fevereiro, março e abril, o decréscimo do valor de radiação solar, variando de 4,0 a 6,0 kWh/m², porém, para essa época do ano, os maiores registros ainda podem ser observados, nas regiões norte, oeste, sudoeste e central.

No mês de abril, os valores de radiação solar, já apresentam uma queda significativa, variando de 3,5 kWh/m² na região do litoral e 4 kWh/m² na região norte.

Prastes et al, 2002, encontraram valores de radiação global, para os meses de janeiro, fevereiro, março e abril, maiores na região oeste (350 a 450 W/m²) e menores na região do litoral paranaense (500 W/m² em abril e 700 W/m² em janeiro).

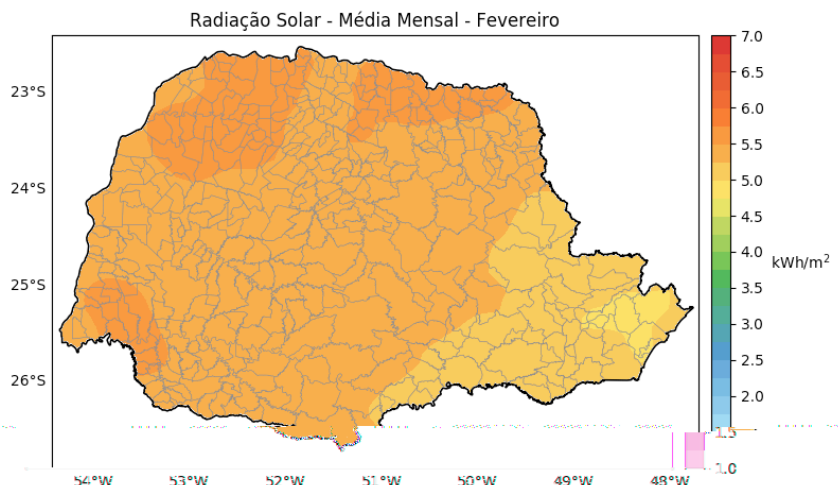


Figura 11 - Radiação solar média mensal – Mês de fevereiro.

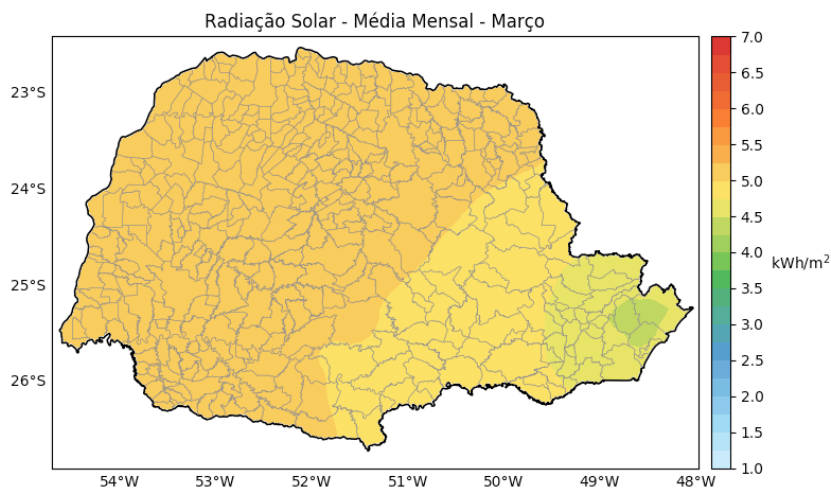


Figura 12 - Radiação solar média mensal – Mês de Março.

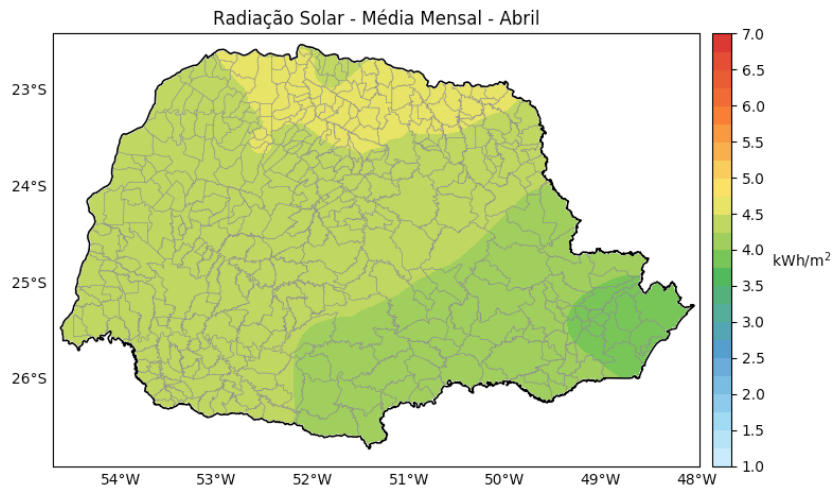


Figura 13 - Radiação solar média mensal – Mês de Abril.

Nos meses de maio, junho e julho, são observados os menores registros de radiação solar, variando de 2,5 a 4,0 kWh/m². As regiões leste, sul e sudeste, são as que apresentam menores valores, ou seja, são as que recebem menor incidência de radiação solar, no período (Figuras 14, 15 e 16). Prates et al, 2002, encontrou para as regiões da capital, litoral e sul do Paraná os menores valores de radiação. Ao longo do ano, estas regiões mostram-se com menor disponibilidade de energia solar em relação à região oeste e norte do estado do Paraná.

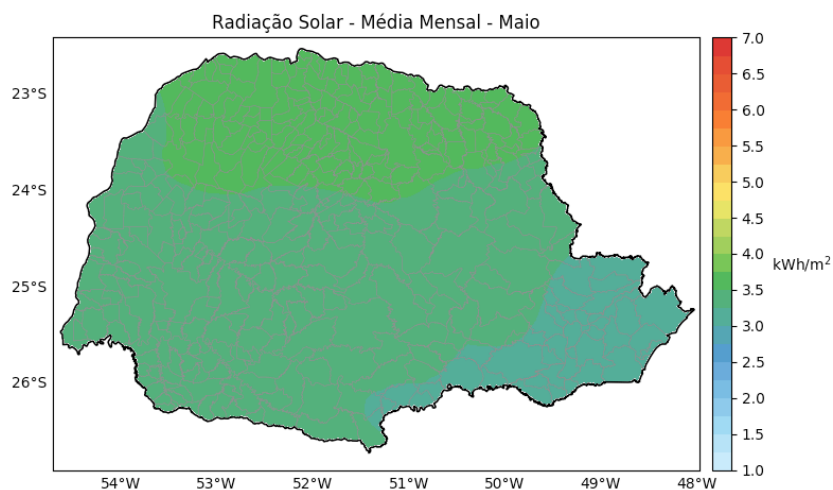


Figura 14 - Radiação solar média mensal – Mês de Maio.

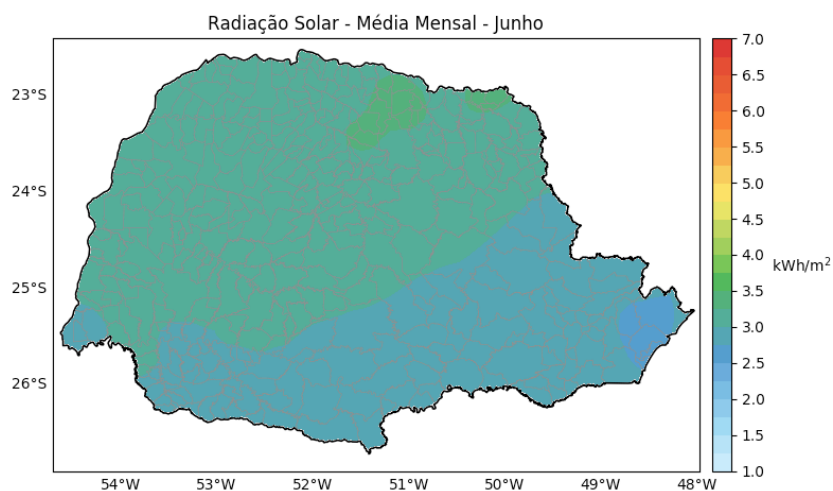


Figura 15 - Radiação solar média mensal – Mês de Junho.

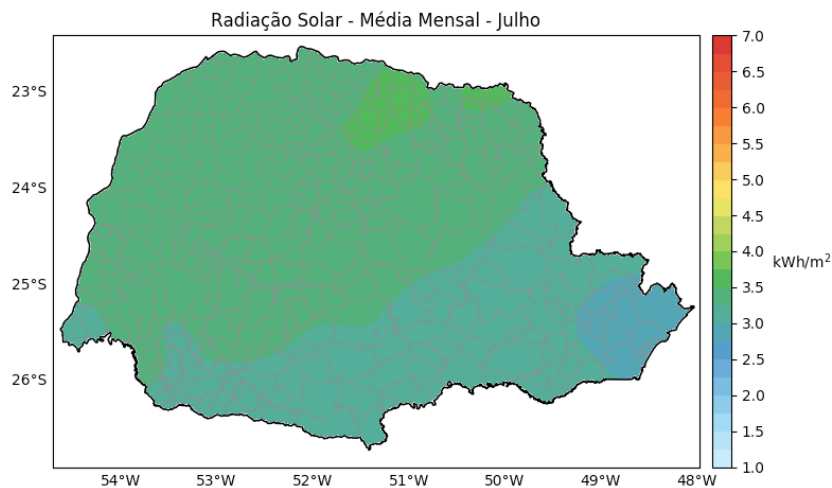


Figura 16 - Radiação solar média mensal – Mês de Julho.

Nos mapas sazonais, observa-se a maior incidência de radiação solar na estação do verão, período em que o Sol encontra-se mais próximo do Hemisfério Sul (Figuras 17, 18, 19 e 20). Drechmer e Ricieri, 2006, observaram que os comportamentos das radiações global e difusa acompanham a irradiação incidente no topo da atmosfera: os maiores índices são na estação do verão, enquanto os menores índices são na estação do inverno.

Os resultados médios sazonais variaram de: verão 5 a 6 kWh/m², outono 3,5 a 4 kWh/m², inverno de 2,7 a 3,5 kWh/m² e primavera de 3,7 a 5,7 kWh/m². Drechmer e Ricieri, 2006, acharam nas cidades de Cascavel e Botucatu, níveis mínimos de irradiação solar em junho e máximos em janeiro, comprovando que nos meses de invernos no hemisfério sul é caracterizado por dias de céu claro, enquanto os verões por dias nublados.

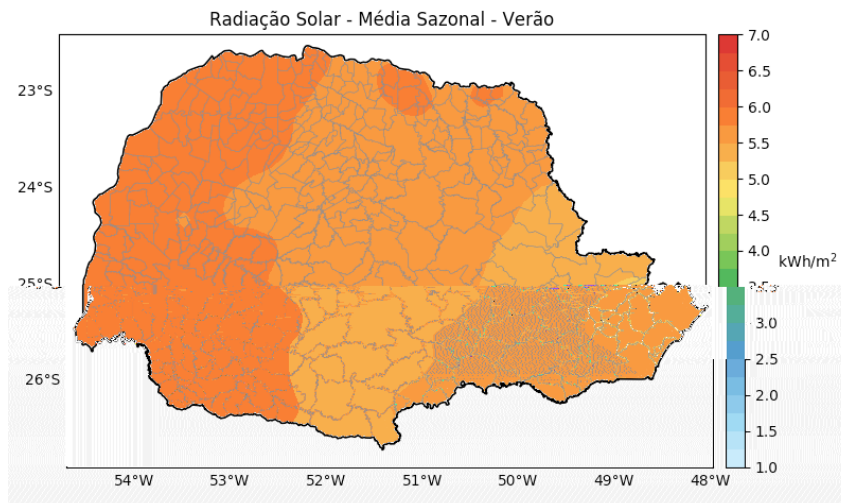


Figura 17 - Radiação solar média Sazonal – estação verão.

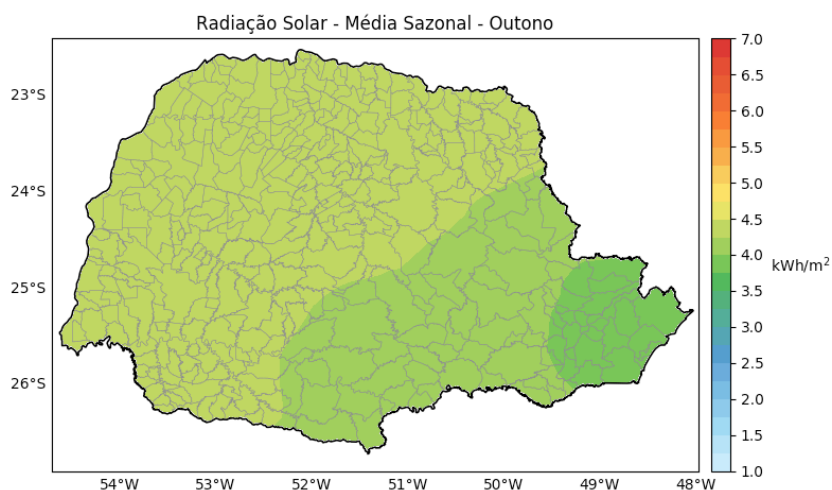


Figura 18 - Radiação solar média Sazonal – estação outono.

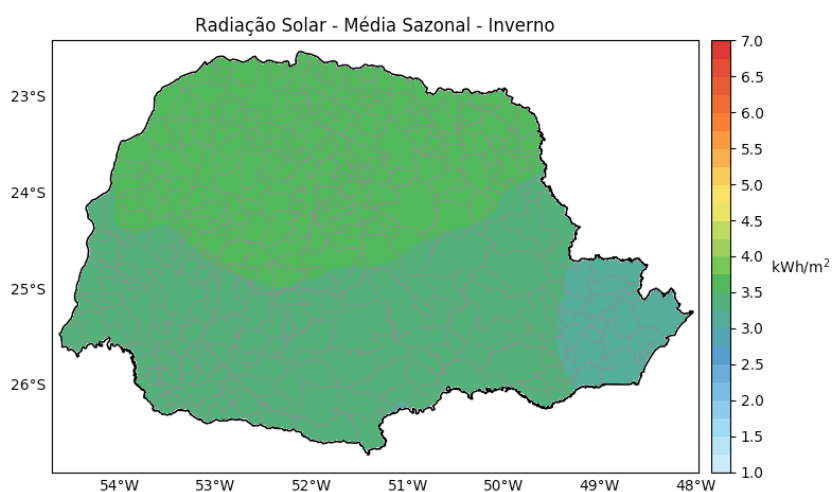


Figura 19 - Radiação solar média Sazonal – estação inverno.

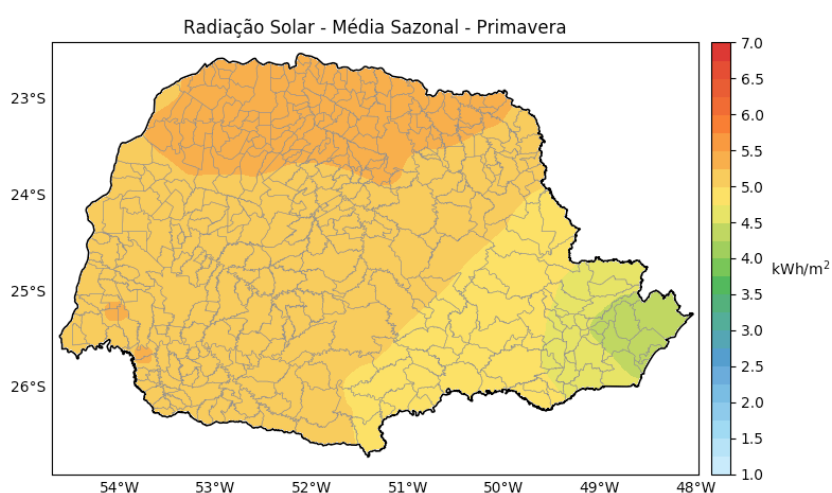


Figura 20 - Radiação solar média Sazonal – estação primavera.

Na Figura 21, observa-se o registro da radiação solar média anual, para o período de 2006 a 2016. A região norte tem predominância dos maiores valores de radiação solar durante o ano, com média entre 4,5 e 5 kWh/m², seguida das regiões oeste, central e sudoeste com valores médios entre 4 e 4,5 kWh/m². Os menores valores médios anuais, são observados nas regiões do litoral e leste do Estado, variando entre 3,5 e 4 kWh/m². Esses

resultados corroboram com os encontrados por Tiepolo, 2015, que observou as menores médias anuais de produção de energia fotovoltaica encontradas nos municípios de Matinhos, Guaratuba, Guaraqueçaba, Pontal do Paraná, Paranaguá, Morretes e Antonina, na região da Serra do Mar e o litoral paranaense. São locais que apresentam maior índice de nebulosidade ao longo do ano, dificultando a incidência de radiação solar. Porém, as regiões norte, oeste, central e parte do sudoeste são regiões com quadro mais favorável a este tipo de projeto.

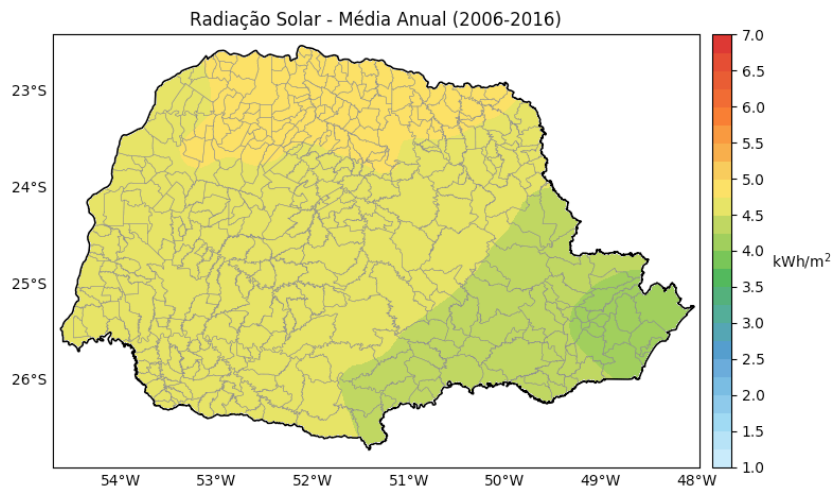


Figura 21 - Radiação solar média anual (2006-2016).

7. Conclusões

Diante dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

Nos mapas de radiação solar média mensal, os menores índices de nebulosidade (maior índice de radiação solar) se concentram nas regiões norte, oeste, central e sudoeste.

A radiação solar média anual, para o período de 2006 a 2016, mostrou que a região norte tem predominância dos maiores valores de radiação solar durante o ano, com média entre 4,5 e 5 kWh/m², seguida das regiões oeste, central e sudoeste com valores médios entre 4 e 4,5 kWh/m². Os menores valores médios anuais, foram observados nas regiões do litoral e leste do Estado, variando entre 3,5 e 4 kWh/m².

Na análise sazonal, a maior incidência de radiação solar se deu na estação do verão e a menor na estação do outono e inverno.

As análises dos mapas revela regiões que são potencialmente mais favoráveis, ao uso por exemplo, de tecnologias fotovoltaicas para geração de energia elétrica, ou a instalação de um sistema ou conjunto de sistemas solares. Nessa análise observou-se, que a região leste mostra-se pouco atraente em vista da baixa incidência de radiação solar na superfície que se verifica ao longo do ano.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS

BAKKALI, S.; AMRANI, M. About the use of spatial interpolation methods to denoising Moroccan resistivity data phosphate "Disturbances" map. **Acta Montanistica Slovaca**, v. 13, n. 2, p. 216-222, 2008.

BORGES, L. E. Python para desenvolvedores. 2. ed. [s.n.], 2010. ISBN 978-85-909451-1-6. Disponível em: <<http://ark4n.wordpress.com/python/>>.

BOTELHO, M. F. et al. Comparação dos resultados de interpoladores "Vizinho mais próximo" e "Inverso de uma distância" no cálculo de volume a partir de dados do laser scanner. **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. Principles of geographical information systems: spatial information systems and geostatistics. Oxford: Oxford University Press, 1998.

- CARVALHO, Paulo Gonzaga Mibielli; BARCELOS, Frederico Cavadas. Mensurando a sustentabilidade. In: MAY, Peter Herman (Org.). *Economia do Meio Ambiente: teoria e prática*. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.
- CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F. Interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas com uso do inverso de potências da distância. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 501–504, 2003.
- DRECHMER, P. A. O.; RICIERI, R. P. Irradiação global direta e difusa, para a região de Cascavel, Estado do Paraná. *Acta Scientiarum Technol. Maringá*, v.28, n.1, p.73-77. Jan/jun, 2006.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar engineering of thermal processes*. 2Ed. New York. John Wiley & Sons. 1991.
- JACOBS, J. M.; MYERS, D. A.; ANDERSON, M. C., & DIAK, G. R. 2000. "GOES Surface insolation to estimate wetlands evapotranspiration" *Journal of Hydrology*, 266, 53-65.
- KRAVCHENKO, A.; BULLOCK, D. G. A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. **Agronomy Journal**, American Society of Agronomy, v. 91, n. 3, p. 393–400, 1999.
- LIRA S. A. **Análise de correlação: Abordagem Teórica e de construção dos coeficientes com aplicações**. Dissertação - UFPR, 2004.
- LU, G. Y.; WONG, D. W. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. **Computers & Geosciences**, v. 34, n. 9, p. 1044 – 1055, 2008. ISSN 0098- 3004.
- MA, Y.; SU, Z.; LI, Z.; KOIKE, T.; MENENTI, M. Determination of regional net radiation and soil heat flux over a heterogeneous landscape of the Tibetan plateau, *Hydrological Processes*, v16, p.2963-2971. 2002.
- MARTINS, Fernando Ramos; PEREIRA, Enio Bueno, Enhancing information for solar and wind energy technology deployment in Brazil, *Energy Policy*, 2011, Vol.39 (7), pp.4378–4390
- NOGUEIRA, J. D. L.; AMARAL, R. F. Comparação entre os métodos de interpolação (Krigagem e Topo to Raster) na elaboração da batimetria na área da folha Touros - RN. **Anais XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 4117-4123.
- PEREIRA, E. B., et al. Atlas brasileiro de energia solar. São José dos Campos: INPE, 2006.
- PRATES, J. E.; ZAICOVSKI, M. B.; GUETTER, A. K. Artigo inventário de energia solar no Paraná. Anais XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz do Iguaçu, Brasil, 2002.
- SHEPARD, D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In: ACM. Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference. [S.l.], 1968. p. 517–524.
- SOUZA J. L. L. L.; et al. Avaliação de métodos de interpolação aplicados à espacialização das chuvas no território identidade Portal do Sertão / Bahia. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, INPE, Curitiba, PR, 2011.
- 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.
- TOMCZAK, M. Spatial interpolation and its uncertainty using automated anisotropic inverse distance weighting (IDW)-cross-validation/jackknife approach. **Journal of Geographic Information and Decision Analysis**, v. 2, n. 2, p. 18–30, 1998.

TSUKAHARA, R.; JENSEN, T.; CARAMORI, P. H. Utilização de Redes Neurais Artificiais para Preenchimento de Falhas em Séries Horárias de Dados Meteorológicos. **XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Belém, PA, 2010.

VENTURA, T. M. **Preenchimento de falhas de dados micrometeorológicos utilizando técnicas de inteligência artificial**. Dissertação (Dissertação em Física Ambiental) - UFMT, 2012.

VICENTE-SERRANO, S. M. et al. Comparative analysis of interpolation methods in the middle ebro valley (Spain): application to annual precipitation and temperature. **Climate Research**, v. 24, n. 2, p. 161-180, 2003.

VIOLA, M. R. et. al. Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.14, n.9, p.970 - 978, 2010.

GLOSSÁRIO

ALBEDO DA SUPERFÍCIE - é a fração de energia refletida por uma superfície em relação ao total de energia nela incidente (expresso em porcentagem).

BALANÇO DE ENERGIA - é a diferença entre a entrada e a saída de elementos de um sistema. Os principais componentes para o balanço de radiação no sistema terrestre são: superfície, atmosfera e nuvens.

CALOR SENSÍVEL E CALOR LATENTE - Calor sensível é aquele que provoca apenas uma variação de temperatura dos corpos, diferenciando-se do calor latente, que muda a estrutura física dos mesmos.

CÉLULA FOTOVOLTÁICA - são dispositivos capazes de transformar a energia luminosa, proveniente do Sol ou de outra fonte de luz, em energia elétrica. Uma **célula fotovoltaica** pode funcionar como geradora de energia elétrica a partir da luz, ou com um sensor capaz de medir a intensidade luminosa.

COMPRIMENTO DE ONDA - é a distância entre valores repetidos sucessivos num padrão de onda. É usualmente representado pela letra grega lambda (λ).

ESCALA SINÓTICA - escala de movimento que compreende fenômenos cuja dimensão horizontal varia aproximadamente entre 2000 e 10000Km e cuja escalas de tempo variam entre dias e semanas. Depressões, anticiclones móveis e depressões frontais são exemplos de fenômenos de escala sinótica.

ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO - é o intervalo completo de todas as possíveis frequências da radiação eletromagnética. O espectro eletromagnético se estende desde as ondas de baixa frequência, ondas de rádio, até as de maior frequência como as da radiação gama.

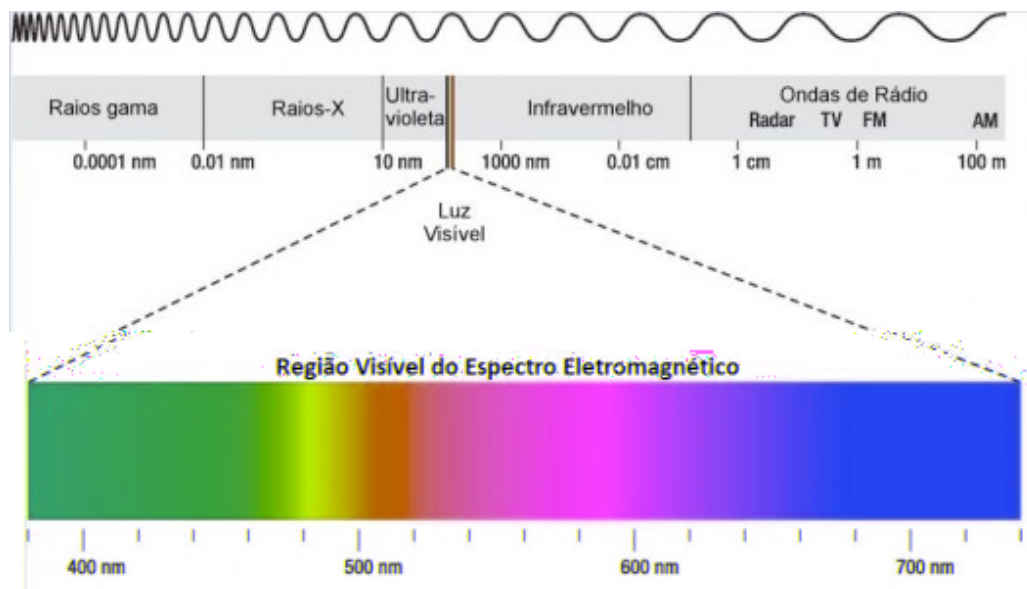


Figura – Espectro Eletromagnético
 (Fonte: <http://know.net/cienciasexactas/fisica/espectroelectromagnetico>)

PLANIMETRIA – O termo planimetria é formado por dois conceitos: plano e metria. O plano é representação gráfica de um espaço, já a metria se refere a um sufixo que expressa medida. Conseqüentemente, a planimetria significa um modo de medir os planos.

RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA - é uma oscilação em fase dos campos elétricos e magnéticos, que, autossustentando-se, encontram-se desacoplados das cargas elétricas que lhe deram origem. As oscilações dos campos magnéticos e elétricos são perpendiculares entre si e podem ser entendidas como a propagação de uma onda transversal, cujas oscilações são perpendiculares à direção do movimento da onda (como as ondas da superfície de uma lâmina de água), que pode se deslocar através do vácuo.

AUTORES

Gláucia M. L. Barbieri: Graduação e Mestrado em Meteorologia, Doutora em Geografia (Física). Atualmente atua em Projetos de Pesquisa na área de Climatologia - SIMEPAR

Angela Beatriz F da Costa: Graduação e Mestrado em Meteorologia, Doutora em Agronomia (Física). Atualmente atua em Projetos de Pesquisa na área de Climatologia – SIMEPAR, Alerta Geadas SIMEPAR/IAPAR.

Camila Oliveira: Programa de pós-graduação em Métodos Numéricos em Engenharia (Doutoranda)/ Registro de imagens de radar meteorológico e modelo numérico de previsão para estudo de tempestades severas –SIMEPAR.

Vanessa D'Ávila - Gerente de Projetos: Técnica em meteorologia no Simepar e atualmente atuando como gerente de projetos. Possui graduação em Comunicação Social - Publicidade e Propaganda pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (2013) e especialização na área de assessoria de imprensa e em gestão de projetos.

Marco Jusevicius – Gerente de Contratos: Possui graduação e Bacharelado em Meteorologia pela Universidade de São Paulo (1990) e mestrado em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (1999). Atualmente é Meteorologista Sênior nível III do Sistema Meteorológico do Paraná. MBA Gestão Estratégica de Empresas - ISAE/FGV (2016)