



## XIX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia

23 a 28 de agosto de 2015

Lavras – MG – Brasil

Agrometeorologia no século 21:



### *O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros*

## **Elaboração de mapas de disponibilidade da radiação solar global no estado de São Paulo com o uso da técnica da krigagem**

*Beatriz Natalia Naimaite<sup>1</sup>; Enzo Dal Pai<sup>2</sup>; Lucas Carvalho Lenz<sup>3</sup>; Esteban Choque Conde<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> Graduanda em Eng. Agrônoma, UNESP/FCA, Botucatu – SP, Fone: (14) 3880-7162, [beatriznaimaite@gmail.com](mailto:beatriznaimaite@gmail.com)

<sup>2</sup> Eng. Agrônomo, Prof. Doutor, Depto. de Engenharia Rural, UNESP/FCA, Botucatu – SP

<sup>3</sup> Mestrando, Programa de PG em Energia na Agricultura, UNESP/FCA, Botucatu – SP

<sup>4</sup> Doutorando, Programa de PG em Energia na Agricultura, UNESP/FCA, Botucatu – SP

**RESUMO:** Neste trabalho visou-se a elaboração de mapas da disponibilidade solar energética do estado de São Paulo para o ano de 2012, a partir da técnica da Krigagem. Os dados utilizados para a elaboração dos mapas foram obtidos do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) de seu conjunto de estações sinóticas. Foram usados dados diários da radiação solar global de 40 estações: 24 estações no Estado de São Paulo e mais 16 estações do entorno do estado (Paraná, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais e Rio de Janeiro) para boa delimitação do contorno dos mapas. Foram feitos 13 mapas: 1 com a média anual da radiação solar global diária e mais 12 mapas com as médias mensais. Foi também realizada uma validação destes mapas com valores diários da radiação solar global em Botucatu-SP, com os dados da estação climatológica da Faculdade de Ciências Agrônomicas-FCA/UNESP-Botucatu. Os resultados apontam um valor de MBE durante o ano de 2012 de 3,64%, demonstrando a tendência do modelo de krigagem superestimar a radiação solar global diária em Botucatu-SP. O valor de RMSE(%) de 14,54%, demonstrando o nível de espalhamento dos dados em relação aos dados de Botucatu-SP.

**PALAVRAS-CHAVE:** krigagem, radiação solar global, mapas.

### **Global solar radiation maps for São Paulo state with the kriging technical**

**ABSTRACT:** The aim of this work was to elaborate available daily solar energy radiation maps for Sao Paulo for the year 2012, using the Kriging technique. The data used in the preparation of the maps were obtained from the INMET (National Institute of Meteorology) of its set of synoptic stations. Global radiation daily data of 40 stations were used: 24 stations in the State of São Paulo and over 16 state surrounding stations (Paraná, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais and Rio de Janeiro) for good delineation of the contour of the maps. 13 maps were made: 1 with the annual average daily solar radiation and 12 more maps to monthly averages. It was also performed a validation of these maps with daily values of global radiation in Botucatu, with data from the meteorological station of the College of Agricultural Sciences-FCA / UNESP-Botucatu. The results indicate an MBE value for the year 2012 of 3,64%, showing the trend of kriging model overestimating income solar radiation in Botucatu. The RMSE value (%) 14,54%, showing the level of scatter of data in relation to Botucatu data.

**KEY WORDS:** kriging technique, global solar radiation, maps.

### **INTRODUÇÃO**

A relação energia e meio ambiente vem sendo discutida de maneira vigorosa nos últimos anos, levando o desenvolvimento, pesquisa e uso de fontes de energia menos poluentes, renováveis e que produzam um baixo impacto ambiental. Porém, a falta de informação e dados científicos impedem uma avaliação correta da viabilidade econômica de projetos que utilizam fontes renováveis no Brasil.

***O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros***

O conhecimento da radiação solar é suma importância para o planejamento e execução de qualquer projeto agrícola e agroindustrial, já que a mesma possui grande influência para a dinâmica atmosférica. O fornecimento de energia para os seres vivos que aqui habitam e para o impulsionamento de circulação atmosférica equilibrando o clima do planeta são só alguns exemplos da sua importância evidente.

A Krigagem é uma metodologia que usa interpolação de dados, possibilitando estimar valores desconhecidos que se localizam entre dois ou mais pontos conhecidos e apresentem uma dependência estatística e espacial.

Segundo o princípio da Primeira Lei da Geografia (TOBLER, 1970), tudo é relacionado com tudo, porém as coisas mais próximas estão mais relacionadas que coisas distantes. A krigagem cabe por utilizar funções matemáticas que reúnem pesos contendo um maior valor nas posições mais próximas e pesos com um menor valor nas posições mais longínquas, criando assim os novos pontos interpolados com base nessas combinações lineares de dados.

Segundo Landim (2006) o termo Geoestatística encontra-se consagrado como um tópico especial da estatística aplicada que aborda problemas referentes às variáveis de uma determinada região, as quais têm um comportamento espacial mostrando características intermediárias entre as variáveis verdadeiramente aleatórias e as totalmente determinísticas. O estudo da variabilidade espacial, a suavização, o desagrupamento, a determinação da anisotropia, a precisão e a incerteza são as vantagens que a geoestatística leva em relação as outras técnicas convencionais de predição são o São justamente nos problemas onde a estatística clássica tem limitações, que o uso da Geoestatística tem suas maiores aplicações (VIEIRA, 2000).

Ainda segundo Vieira (2000), todos os cálculos geoestatísticos interagem com o modelo ajustado do semivariograma. Consequentemente, se a estimativa for feita de maneira errônea o krigagem não será efetuada de maneira correta, comprometendo a qualidade da mesma.

A krigagem é um método no qual se usa um semivariograma para quantificar a variação espacial. O semivariograma nada mais é que um gráfico de dispersão no qual encontra-se em seus eixos os valores da semivariância pela distância dos pontos amostrados. A semivariância é a metade da variância, ou seja, ela é uma medida de dispersão. Dentre os usos do semivariograma pode-se citar a análise da dependência espacial entre as amostras como um dos mais expressivos (MARCUIZZO et al., 2010).

A interpolação consiste na estimativa e aproximação de valores desconhecidos, tendo como base uma função inicial definida pela distância entre pontos (BARROSO et al., 1987). A utilização do semivariograma para a estimativa por krigagem não exige que os dados tenham distribuição normal, porém a presença de distribuição assimétrica, contendo diversos valores irregulares, deve ser considerada, pois a krigagem é um estimador linear (LANDIM, 2006). O que diferencia a krigagem de outros métodos de interpolação é a estimação de uma matriz de covariância espacial que/ determina os pesos atribuídos às diferentes amostras, o tratamento da redundância dos dados, a vizinhança a ser considerada no procedimento inferencial e o erro associado ao valor estimado. Além disso, a krigagem também fornece estimadores exatos com propriedades de não tendenciosidade e eficiência (CAMARGO, 1998).

Os objetivos deste trabalho são:

- a) Verificar a possibilidade de se utilizar a técnica da krigagem para se obter estimativas da radiação solar;
- b) Elaborar mapas com médias mensais e anual;
- c) Validar o modelo de krigagem obtido com dados do INMET com dados da Estação de Radiometria Solar da Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP-Botucatu-SP.



## XIX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia

23 a 28 de agosto de 2015

Lavras – MG – Brasil

Agrometeorologia no século 21:

*O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros*



### MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados foram adquiridos da

página na Internet do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Este instituto possui uma rede de estações de superfície monitorando o clima de maneira intermitente. Os dados estão disponíveis em <http://www.inmet.gov.br/sonabra/maps/automaticas.php>.

Entretanto, nem todas as estações do INMET medem de rotina a radiação solar ou tem o ano de 2012 inteiramente disponível em seu banco de dados. Neste trabalho foram usadas informações sobre radiação solar em estações meteorológicas dentro do estado de São Paulo que apresentassem consistência nos dados, e mais algumas estações vizinhas em outros estados (PR, RJ, MG e MS).

Os dados sobre radiação solar disponíveis estão no formato integrado, tendo seus valores em energia (MJ ou KJ por m<sup>2</sup>), integrados na hora. Para se obter o valor diário foi necessário se somar todos os valores horários de um dia. Utilizou-se dados de radiação solar de 40 estações distribuídas no estado de São Paulo e seu entorno. Estes foram empregados para a verificação de dependência espacial dos parâmetros por meio do semivariograma experimental isotrópico a partir da expressão (Journel, 1989):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(s+h) - Z(s)]^2 \quad (1)$$

em que  $Z(s)$  e  $Z(s+h)$  são pares de valores medidos em locais afastados entre si da distância  $h$  e  $N(h)$ , número de pares de pontos amostrais do atributo  $h$ . O uso desse estimador prognostica que a propriedade atenda a uma condição de estacionariedade, segundo a qual, no mínimo a hipótese intrínseca é atendida (Journel & Huijbregts, 1978).

ID	Cidade/ estação	Latitude	Longitude
1	Água clara	-20,4442	-52,8756
2	Ariranha	-21,1328	-48,8403
3	Avaré	-23,0997	-48,9455
4	Barra bonita	-22,4711	-48,5575
5	Barra do Turvo	-24,9631	-48,4164
6	Barretos	-20,5586	-48,5450
7	Barueri	-23,5233	-46,8692
8	Bauru	-22,3577	-49,0286
9	Casa branca	-21,7797	-47,0750
10	Castro	-24,7894	-49,9997
11	Campos do Jordão	-22,7500	-45,6039
12	Conceição das Alagoas	-19,9858	-48,1525
13	Curitiba	-25,4486	-49,2300
14	Diamante do Norte	-22,6394	-52,8901
15	Franca	-20,5844	-47,3825
16	Ibaiti	-23,7731	-50,1806
17	Ibitinga	-21,8556	-48,8000
18	Iguape	-24,6717	-47,5461
19	Itapeva	-23,9814	-48,8853
20	Itapira	-22,4150	-46,8053
21	Ituverava	-20,3594	-47,7750
22	Joaquim Távora	-23,5053	-49,9464
23	Lins	-21,6655	-49,7344
24	Maria da Fé	-22,3142	-45,3731
25	Maringá	-23,4050	-51,9328
26	Monte verde	-22,8500	-46,0500
27	Nova Fátima	-23,4152	-50,5778
28	Paranapoema	-22,4917	-52,1344
29	Parati	-23,2233	-44,7267
30	Passa Quatro	-22,3875	-44,9713
31	Passos	-20,7453	-46,6339
32	Presidente Prudente	-22,1166	-51,4000
33	Pradópolis	-21,3383	-48,1139
34	Rancharia	-22,3725	-50,9742
35	São Carlos	-21,9800	-47,8836
36	São Paulo	-23,4964	-46,6200
37	São Luís do Paraitinga	-23,2283	-45,4172
38	São Miguel Arcanjo	-23,8516	-48,1645
39	Três Lagoas	-20,7833	-51,7000
40	Valparaíso	-21,3192	-50,9303

**Tabela 1:** Lista das cidades/estações do Instituto Nacional de Meteorologia utilizadas no trabalho, com suas latitudes e longitudes, em décimos de graus.

Para elaboração dos mapas e semivariogramas com a krigagem utilizou-se um programa específico para elaboração de variogramas e krigagem, chamado *GS+ Geostatistics for the Environmental Sciences*<sup>®</sup>, versão 7.0, desenvolvido por Gamma Design Software<sup>®</sup>.

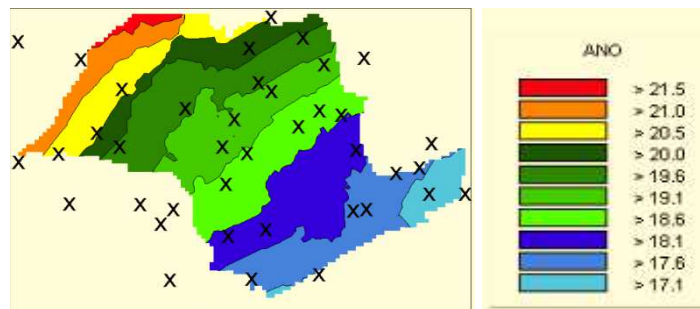
*O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros*

A validação dos dados foi realizada com dados da Estação de Radiometria Solar da Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP – Botucatu, situada na latitude  $-22^{\circ}53'09''$  e longitude  $-48^{\circ}26'42''$ , no centro-oeste do estado de São Paulo. Os dados desta estação agrometeorológica são obtidos de maneira similar ao INMET. A radiação global é medida por um piranômetro Eppley®-PSP, com frequência de varredura de 0,2 Hz e tempo de aquisição de 5 min. Os valores são integrados na partição diária. Estes dados foram usados para comparação e validação dos modelos.

Para validação da krigagem serão usados os indicadores estatísticos MBE e RMSE.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 é apresentado o mapa elaborado com o uso da técnica da krigagem da média anual da radiação solar global.



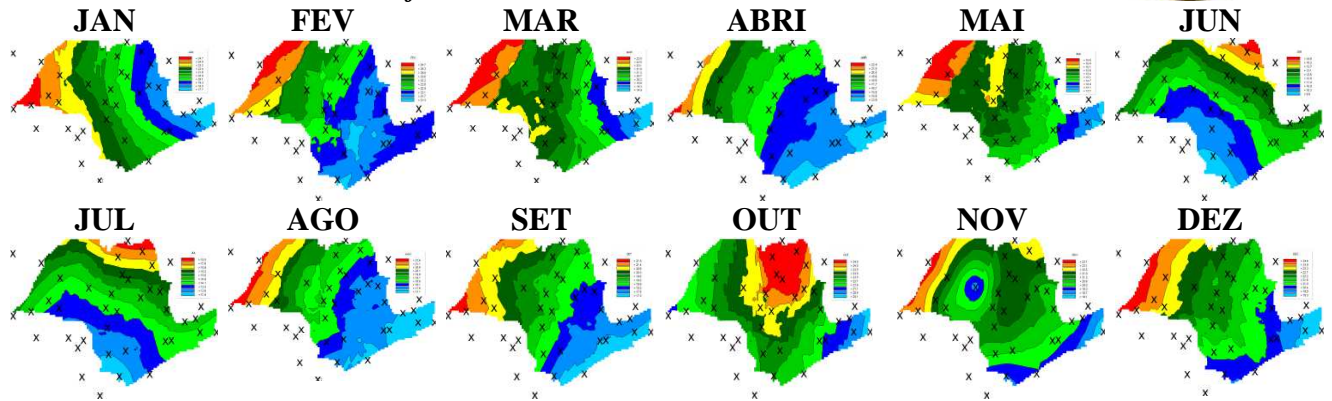
**Figura 1** – Mapa da radiação solar global média anual elaborado com a técnica da krigagem no estado de São Paulo. Os dados da escala representam o valor médio mensal, em  $\text{MJ}/\text{m}^2$  dia.

Os pontos marcados com um “X” representam as estações do INMET e seus dados foram utilizados para elaboração de um mapa de contornos onde cada cor representa uma faixa ou um intervalo energético. Quase todas as 40 estações estão bem apresentadas na Figura 1. Nota-se maior concentração de pontos no centro do estado. Os pontos fora do estado de São Paulo foram utilizados para elaboração dos contornos do mapa.

Na distribuição energética apresentada pelo mapa pode-se notar um gradiente noroeste sentido sudeste. Níveis energéticos no noroeste do Estado de São Paulo são notoriamente maiores, e esses níveis vão decaindo conforme se encaminha para sudeste. Esse gradiente pode ter várias explicações: a nebulosidade, o efeito da latitude e a continentalidade. Como o mapa foi elaborado com base na radiação solar global média mensal, provavelmente as localidades com menor índice energético apresentaram maior número de dias nublados, o que faz a radiação global média mensal diminuir seu valor (o mapa tem grande capacidade de se relacionar com nebulosidade).

Também há a interferência da latitude sobre o modelo. Em um intervalo de 1 ano localidades mais ao norte do Estado de São Paulo tem maior incidência solar. A continentalidade pode ter influência sobre a nebulosidade, uma vez que quanto mais próximo a grandes corpos d’água maior é a tendência de aumento da presença de água e, conseqüentemente, aumento da nebulosidade.

*O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros*



**Figura 2** – Mapas mensais da radiação solar global no estado de São Paulo elaborados com a técnica da krigagem. Os níveis energéticos são aproximados aos da Figura 1.

Na Figura 2 são apresentados 12 mapas semelhantes ao da Figura 1, com as médias mensais de todas as estações do INMET. Nota-se grande diferença no padrão do aparecimento de gradientes energéticos no estado de São Paulo no decorrer de um ano.

O gradiente energético da Figura 1 assemelha-se a alguns meses do ano: Janeiro, Fevereiro, Março, Agosto, Setembro, Novembro e Dezembro.

Nota-se uma mudança no padrão nos meses de Junho e Julho. Estes meses apresentam as menores temperaturas médias do ano em quase todo o estado de São Paulo. A mudança no gradiente energético, que nestes meses foi de Sul→Norte provavelmente explica-se pela entrada de frentes frias no período, que sempre trazem aumento de nebulosidade por sua passagem.

### Validação

O mapa elaborado com a krigagem é um modelo de estimativa. No mapa elaborado com essa técnica foi selecionado o ponto que corresponde a localização da FCA-UNESP-Botucatu. Neste ponto foi anotado o valor energético gerado pelo mapa. Com isto é possível se realizar uma validação com os valores medidos dela FCA-UNESP-Botucatu.

Para validação foram utilizados dois indicadores estatísticos tradicionalmente usados em experimentos agrometeorológicos: o MBE (Mean Bias Error) e o RMSE (Root Mean Square Error). O MBE é usado para se averiguar se o modelo subestima ou superestima os valores reais, enquanto o RMSE serve para se averiguar a dispersão dos dados.

O resultado do MBE foi de 0,67 MJ/m<sup>2</sup> ou MBE(%) de 3,64%, enquanto o valor do RMSE foi de 2,66 MJ/m<sup>2</sup> ou RMSE (%) 14,54. O valor de MBE indica que o valor obtido do mapa de krigagem tem a tendência de superestimar os dados medidos em 3,64%. O RMSE indica espalhamento dos dados em um ajuste de modelo. Estes valores dependem muito da partição temporal trabalhada e segundo Dal Pai (2014) estes valores são comuns.

### CONCLUSÕES

A elaboração de mapas contendo níveis energéticos da radiação solar com técnica da krigagem se demonstrou possível e satisfatória, haja visto a clara delimitação entre faixas homogêneas. É possível se estimar ou se conhecer a quantidade energética de cada região via esta técnica, com uma boa acurácia, evidenciada pelos bons indicadores estatísticos.



## XIX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia

23 a 28 de agosto de 2015

Lavras – MG – Brasil

Agrometeorologia no século 21:

*O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros*



### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARROSO, L. C., BARROSO, M. M., CARVALHO, M. L. B., MAIA, M. L., **Cálculo Numérico (com aplicações)** – 2º edição, Editora Harbra Ltda. – São Paulo. 1987. página 151-204

CAMARGO, E. C. G. **Geoprocessamento para Projetos Ambientais: Geoestatística: Fundamentos e Aplicações.** 1998. Disponível em: <[http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis\\_ambiente/5geoest.pdf](http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/5geoest.pdf)>. Acesso em: 03 abr 2015.

DAL PAI, E. **Modelos de Estimativa da Radiação Atmosférica em Função da Temperatura, Umidade e dos Índices Radiométricos Kt e Kd para Botucatu-SP.** 2014. 66p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu.

JOURNEL, A.G. **Fundamentals of Geostatistics in Fivelessons.** Washington, American Geophysical Union, 1989. 40p.

JOURNEL, A.G. & HUIJBREGTS, Ch.J. **Mining geostatistics.** London, Academic Press, 1978. 600p.

LANDIM, P.M.B. 2006. **Sobre Geoestatística e Mapas.** Terra Didatica, 2(1):19-33. Disponível em: <[http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/v2/pdf-v2/t\\_didatica\\_2006\\_v02n01\\_p019-033\\_landim.pdf](http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/v2/pdf-v2/t_didatica_2006_v02n01_p019-033_landim.pdf)> Acesso em: 06 abr 2015.

MARCUZZO, F. F. N.; CARDOSO, M. R. D.; MELLO, L. T. A. **Uso dos Métodos de Krigagem e Spline de Tensão no Mapeamento de Chuvas na Região Metropolitana de Goiânia e Seu Entorno.** II Simpósio Internacional Caminhos Atuaisda Cartografia na Geografia. São Paulo: EDUSP. 2010. p. 128-128. Disponível em: <[http://www.cprm.gov.br/publique/media/Evento\\_Uso\\_Marcuzzo.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/Evento_Uso_Marcuzzo.pdf)>. Acesso em: 02 abr 2015.

TOBLER, W. R. **A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region.** EconomicGeography, Worcester, v. 46, n. 1, p. 234–240, 1970.

VIEIRA, S.R. **Geoestatística em Estudo de Variabilidade Espacial do Solo.** In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., H.V. & SCHAEFER, C.E.G.R., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000.v.1, p.1-55.