

Análise da correlação espacial entre altitude e temperatura média do ar no Estado de São Paulo

Spatial correlation analysis between altitude and medium air temperature in São Paulo State

Marcio Colombo Fenille
Doutorando em Matemática - USP - São Carlos

Márcio Cardim
Professor Doutor – DMEC – UNESP - Presidente Prudente
Núcleo de Pesquisa - FAI

Resumo

A temperatura do ar é um dos fenômenos de maior importância na determinação do clima, e, como a maioria dos demais fenômenos climáticos, apresenta uma variabilidade espacial contínua, que pode ser detectada por meio de poderosos métodos geoestatísticos. Conhecida a grande influência do relevo topográfico no clima específico de cada região, é de se esperar que esta variável apresente correlações espaciais com a temperatura do ar, e que o conhecimento desta correlação possa, de alguma maneira, auxiliar na elaboração de conclusões mais precisas, que envolvam estes fenômenos. Neste trabalho, analisa-se rigorosamente a variabilidade espacial da altitude e dos índices térmicos, além da correlação existente entre estas variáveis. Concluiu-se, assim, que estas variáveis apresentam forte dependência espacial e são inversamente correlacionadas. Esta última conclusão pode ser claramente evidenciada por meio da comparação dos mapas de isolinhas da ocorrência de cada fenômeno.

Palavras-chave: Temperatura. Isolinhas. Mapas. Correlação.

Abstract

The air temperature is one of the most important phenomenon to determinate the climate and, as most of the other climatic phenomena, shows a continuous spatial variability that can be detected through powerful geostatistical methods. Besides the great influence that the topographic relief has in the specific climate of each region, it is normal to expect that this variable show spatial correlations with air temperature, and that the knowledge of this correlation could somehow help us elaborating more precise conclusions involving these phenomena. In this work we analyze rigorously the spatial variability of altitude and temperature data, besides the existing correlation between these variables. We conclude thus that these variables show strong spatial dependence and are inversely correlated, and this last conclusion can be clearly shown through a comparison of maps with isolines of each phenomenon.

Keywords: Temperature. Isolines. Maps. Correlation.

Introdução

Freqüentemente, muitos dos fenômenos ocorrem de forma correlacionada à ocorrência de outros e am-

bos apresentam uma dependência espacial contínua, que pode ser analisada por métodos geoestatísticos especiais. Estas propriedades estão, em geral, presentes e suficientemente bem definidas, nos fenômenos climáticos de maior influência na determinação do clima e de maior interesse agrícola. A temperatura do ar é, sem dúvida, uma das mais importantes variáveis climáticas e, por ser de medição razoavelmente fácil, acaba muitas vezes analisada por processos estatísticos pouco seguros, que não consideram sua variabilidade espacial, tampouco sua correlação com outros fenômenos. Embora se conheça a forte influência do relevo topográfico na determinação do clima, um estudo mais aprofundado de sua real correlação com outros fenômenos, exige a utilização de poderosas ferramentas geoestatísticas, ainda pouco utilizadas. Neste trabalho, busca-se analisar com o máximo rigor matemático, a variabilidade espacial da temperatura do ar e da altitude do Estado de São Paulo, bem como, a correlação espacial entre estas variáveis. Para tanto, se faz necessário a introdução de alguns conceitos geoestatísticos.

Segundo Cardim (2001), um dos métodos mais utilizados para analisar a dependência espacial ou dependência de tempo entre observações vizinhas, é a autocorrelação. Este método, que tem suas origens em análises de tempo-série, foi intensivamente usado na área das ciências exatas e da terra. Por ser uma medida da dependência entre amostras vizinhas, tem aplicações importantes, como por exemplo, a localização de regiões com características semelhantes, fator determinante para a tomada de decisões.

Goovaerts (2000) alerta que boas estimativas da distribuição espacial de dados climáticos somente são conseguidas com alta densidade de estações meteorológicas, mas isto acarreta alto custo operacional. Desta forma, existe a necessidade de bons métodos estatísticos de estimação de variáveis climáticas em locais não observados.

Fenille & Cardim (2003) estudaram a variabilidade espacial da temperatura do ar e a ocorrência de precipitações no Estado de São Paulo. Mapearam o comportamento contínuo e variado desses fenômenos por meio de técnicas geoestatísticas. Aplicações de modelos matemáticos e estatísticos, aliados a software computacionais, possibilitam melhor entendimento de muitos fenômenos que ocorrem na natureza.

$E\{Z_k(x_{ki})\} = \bar{m}_k$
 O estudo da correlação espacial da altitude e temperatura do ar é de fundamental importância, principalmente para a agricultura. Do ponto de vista agrícola, o clima é caracterizado, em grande parte, pelas variáveis altitude, precipitação pluviométrica e temperatura do ar, sendo estes os fatores que mais interferem na produção agrícola.

Metodologia

Considere um campo S para o qual dois conjuntos de variáveis, $\{Z_1(x_{1i}), i = 1, \dots, N_1\}$ e $\{Z_2(x_{2i}), i = 1, \dots, N_2\}$, foram medidas, correspondendo a realizações particulares das funções aleatórias $Z_1(x_{1i})$ e $Z_2(x_{2i})$, respectivamente. Assumindo estacionariedade de segunda ordem, o primeiro momento estatístico de $Z_k(x_{ki})$, $k = 1, 2$, é dado por (MATHERON, 1963)

$$E\{Z_k(x_{ki})\} = \bar{m}_k, \text{ para qualquer } x_{ki} \text{ em } S,$$

onde E denota o Operador Esperança. A função covariância de Z_k existe e é definida como

$$C_{kk}(h) = E\{Z_k(x_{ki} + h)Z_k(x_{ki})\} - \bar{m}_k^2.$$

Já a covariância cruzada entre Z_1 e Z_2 é dada por

$$C_{12}(h) = E\{Z_1(x_{1i} + h) Z_2(x_{2i})\} - m_1 m_2,$$

enquanto a covariância cruzada entre Z_2 e Z_1 é definida, de modo similar, como

$$C_{21}(h) = E\{Z_2(x_{2j} + h) Z_1(x_{1i})\} - m_2 m_1.$$

Em geral, em análises geoestatísticas não é requerido que as variáveis sejam estacionárias de segunda ordem, mas somente que sejam *intrinsecamente estacionárias*, ou seja, $E\{Z_k(x_{ki} + h) - Z_k(x_{ki})\} = 0$ e $E\{[Z_k(x_{ki} + h) - Z_k(x_{ki})]^2\}$ é constante para todo par amostrado $(x_{ki}, x_{ki} + h)$, $k = 1, 2$.

Deste modo, fica bem definida a função Semivariograma, a saber,

(1)

Contudo, esta função expressa somente propriedades espaciais de uma única variável isolada. Para o estudo da correlação espacial entre duas variáveis, Z_1 e Z_2 , utiliza-se o Semivariograma Cruzado, o qual é definido pela equação

$$\gamma_{12}(h) = \gamma_{21}(h) = \frac{1}{2} E\{[Z_1(x_i + h) - Z_1(x_i)][Z_2(x_i + h) - Z_2(x_i)]\} \quad (2)$$

que pode ser estimada, em termos práticos, por

$$\gamma_{12}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{[Z_1(x_i + h) - Z_1(x_i)][Z_2(x_i + h) - Z_2(x_i)]\} \quad (3)$$

onde $N(h)$ denota o número de pares de valores $(x_i, x_i + h)$ amostrados simultaneamente para Z_1 e para Z_2 separados por um vetor de norma h . A palavra *simultaneamente* aqui mencionada é que nos permite o índice k , $k = 1, 2$, dos pontos amostrais, denotando-os por somente x_i .

Comparando-se a equação 2 do Semivariograma Cruzado, com a equação 1 do Semivariograma, pode-se notar que este último é um caso particular do primeiro, quando as duas variáveis são idênticas. Este fato, aliado ao produto das diferenças de duas variáveis prejudica a intuição do que deve ocorrer com $\gamma_{12}(h)$, quando h aumenta de zero até a distância máxima. No entanto, resultados bastante precisos a este respeito já foram apresentados em (FENILLE & CARDIM, 2004).

Uma característica interessante da equação 3 decorre do fato, de que não importa se o número de amostras de uma das variáveis seja superior ao da outra, pois o Semivariograma Cruzado, apenas será calculado, utilizando informações existentes para posições geográficas coincidentes. Assim, o programa computacional, que for desenvolvido para executar a equação 3, deverá primeiramente, verificar se os dois conjuntos de dados, são definidos para posições idênticas, para então, calcular as diferenças. Em Fenille & Cardim (2004) é apresentado um programa em linguagem *Matlab*, que não apenas executa a equação 3, e conseqüentemente a equação 1, mas também, o mapeamento das variáveis pelo processo de

Cokrigagem, por meio do qual, se estima os valores assumidos por uma variável em locais não amostrados, utilizando-se das informações de ambas. Todo o rigor matemático do processo de *Cokrigagem*, foi trabalhado em (FENILLE & CARDIM, 2004).

A equação do Semivariograma Cruzado é a mais eficiente ferramenta para a análise da correlação espacial entre fenômenos espacialmente dependentes, cuja variabilidade espacial tenha sido devidamente detectada e analisada pelo ajuste de uma função contínua monótona, crescente ao gráfico discreto gerado pela equação do Semivariograma.

Resultados e discussões

Para a análise da altitude e índices pluviométricos médios do estado de São Paulo dispõe-se de um conjunto de dados padronizados para uma série histórica de trinta anos, fornecidos pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) e o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). Eliminadas as posições de não concordância nos pontos de amostragem entre as duas variáveis, como requerido para a aplicação da função Semivariograma Cruzado, o conjunto de dados dispõe, de informações coletadas em 204 postos meteorológicos do estado de São Paulo, distribuídos de acordo com a figura 1.

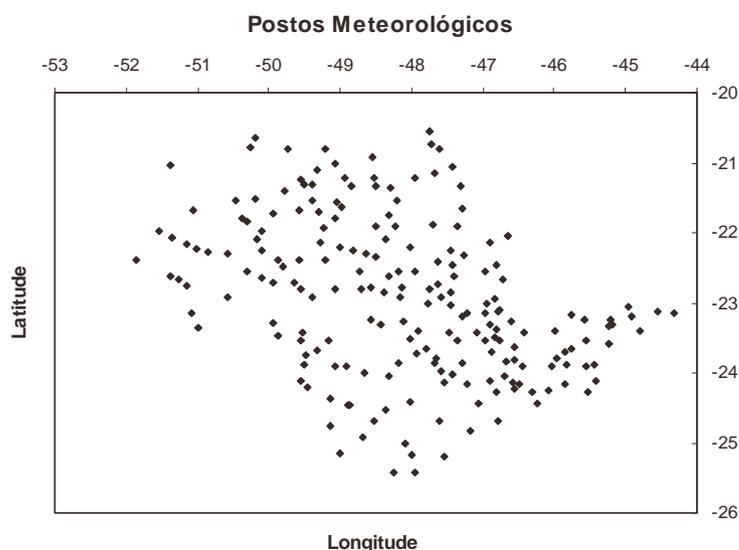


FIGURA 1 - Postos Meteorológicos do Estado de São Paulo

Os dados foram submetidos à compilação, num programa computacional chamado de *Varlle* Fenille & Cardim (2004), que foi confeccionado em Linguagem de Programação *Matlab*, exclusivamente para análises geoestatísticas. Tal programa é capaz de processar os dados de duas variáveis conjuntamente, e exprimir os resultados gráficos obtidos pela aplicação das funções Semivariograma e Semivariograma Cruzado. Além disso, pode-se por meio de *Varlle*, realizar os ajustes necessários aos gráficos obtidos. Deste modo, *Varlle* tornou-se uma ferramenta fundamental para a realização deste trabalho, uma vez já comprovada sua eficiência e baixo custo computacional.

Nos resultados obtidos na análise espacial da altitude, observa-se uma grande variação das semivariâncias, que se compreenderam entre o efeito pepita $C_0 = 100$ e o patamar $C_0 + C = 3,5 \times 10^4$. O Semivariograma experimental para esta variável, gerado por *Varlle* e mostrado na Figura 2, foi ajustado pelo modelo exponencial, tomando a forma $\gamma(h) = 35000[1 - \exp(-h)]$.

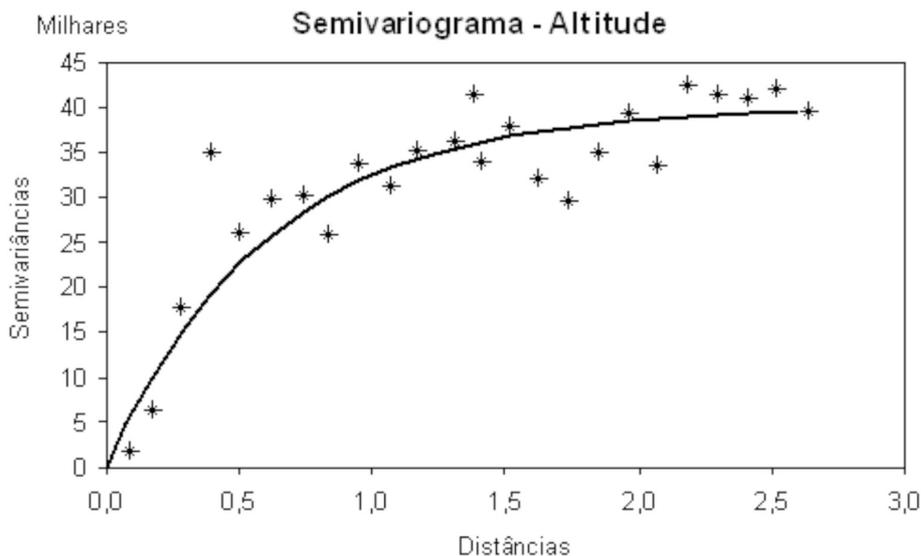


FIGURA 2 - Semivariograma experimental da altitude do estado de São Paulo

Observe que este gráfico indica a existência de dependência espacial da variável, até uma distância de aproximadamente 2,5 graus de coordenadas geográficas, e um efeito pepita bastante reduzido. Com a

relação $\frac{C_0}{C_0 + C} = \frac{1,0 \times 10^2}{3,5 \times 10^4} \cong 2,86 \times 10^{-3} \ll 0,25$ verificou-se que a dependência espacial caracte-

rística da variação da altitude no estado de São Paulo é muito forte para distâncias menores que o alcance, cujo valor ficou, determinado pelo modelo ajustado em $a = 3$ graus de coordenadas geográficas.

Considerando que esta dependência espacial é muito forte, é de se esperar que se obtenham ótimos resultados, caso os dados de altitude, bem como o modelo do Semivariograma, ajustado para esta variável, venham a ser utilizados no mapeamento de outras variáveis, que, por algum motivo, estejam a esta correlacionadas.

No intuito de buscar estas contribuições acerca da variabilidade e influência da altitude para uma determinação mais precisa da variação da temperatura do ar no Estado de São Paulo, imergiram-se os dados dispostos para esta variável, num cruzamento com os dados de altitude. Esta imersão foi, mais uma vez, compilada por Varlle, que gerou o gráfico do Semivariograma experimental para esta variável, expresso na Figura 3.

Este Semivariograma, foi ajustado por um modelo Gaussiano tomando a forma

$\gamma(h) = 0,5 + 1,6 \left[1 - \exp\left(-\frac{h^2}{12}\right) \right]$, uma vez que os parâmetros fundamentais do Semivariograma, fo-

ram estimados em, efeito pepita $C_0 = 0,5$, patamar $C_0 + C = 2,1$ e alcance da dependência espacial

$a = 6$ graus de coordenadas geográficas. A relação $\frac{C_0}{C_0 + C} = \frac{0,5}{2,1} < 0,25$ indica forte dependência

espacial para este fenômeno, e esta dependência, como se tem visto, é bastante abrangente, atingindo um raio de até 6 graus em coordenadas geográficas; o que para as dimensões do estado de São Paulo, região onde se realiza este estudo, é um número muito expressivo.

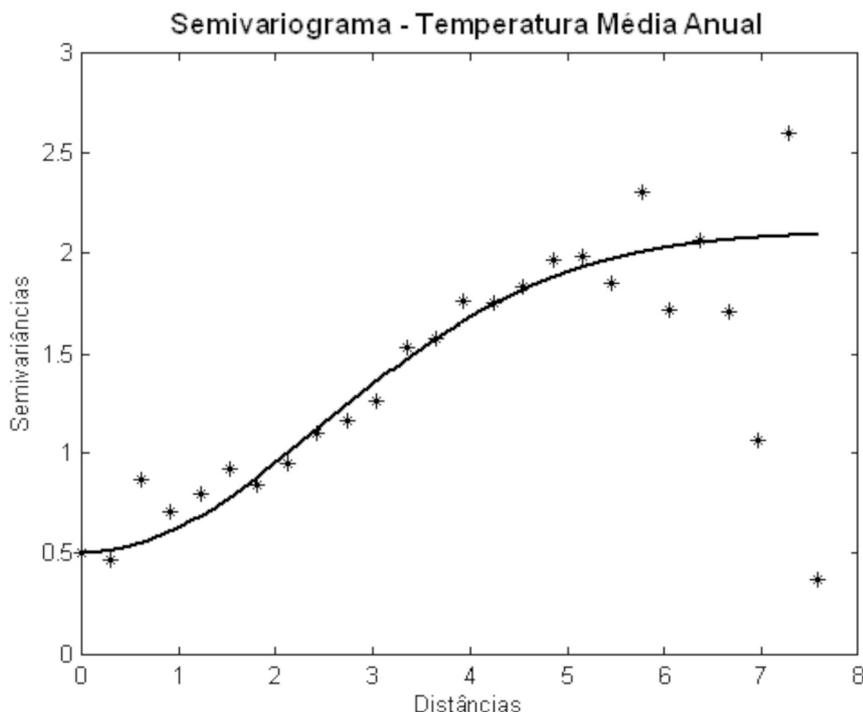


FIGURA 3 - Semivariograma experimental da temperatura do ar do estado de São Paulo

Na execução do cruzamento das duas variáveis, obteve-se com a função Semivariograma Cruzado, um conjunto discreto de pontos, que indicam semivariância cruzada negativa até uma distância de aproximadamente graus, e semivariância cruzada positiva para distâncias superiores a graus de coordenadas geográficas. O gráfico obtido pôde ser ajustado por um modelo Gaussiano negativo

$$\gamma_{12}(h) = -0,1 - 60,9 \left[1 - \exp\left(-\frac{3}{64}h^2\right) \right], \text{ tal qual está expresso na Figura 4.}$$

Com a análise deste modelo verificou-se a existência de uma forte correlação espacial entre a altitude e a temperatura do ar no estado de São Paulo, ficando determinada para a mesma um alcance graus de coordenadas geográficas, um efeito de descontinuidade muito próximo de zero, e um patamar ou correlação total aproximadamente igual a $\gamma_{12}(7) \cong -55$.

O fato das semivariâncias cruzadas serem negativas para distâncias inferiores ao alcance da correlação espacial, indica que a altitude e a temperatura do ar, são fenômenos inversamente correlacionados, o que pode ser interpretado de forma prática, como a existência de uma relação inversa entre a variação dos dois fenômenos, ou seja, à medida que o valor assumido por uma das variáveis cresce, os valores da outra decresce. Fica assim confirmado, um resultado já esperado e que, afirma que em regiões de maior altitude, as temperaturas são mais baixas e vice-versa. Exemplos deste fato podem ser encontrados, comparando-se os dados amostrais coletados em alguns municípios do estado. Na tabela abaixo, apresenta-se um dos possíveis exemplos.

O conhecimento da correlação espacial entre estes dois fenômenos, obviamente fundamentais para a determinação do clima, bem como suas características e fundamentos principais, poderão contribuir imensamente para o mapeamento e compreensão da variação da temperatura do ar no estado de São Paulo e, ainda, acerca da elaboração de conclusões mais seguras que por algum motivo envolvam estes fenômenos.

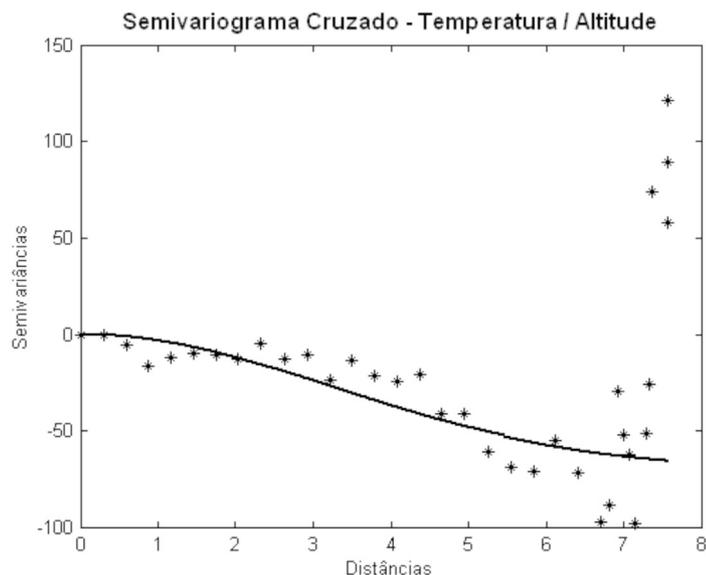


FIGURA 4 - Semivariograma Cruzado entre a temperatura do ar e a altitude

TABELA - Exemplo da relação inversa entre a variação da altitude e da temperatura média do ar

Município	Altitude (m)	Temperatura média anual (°C)
Santos	5	24,8
Presidente Prudente	475	22,7
São Carlos	829	20,5
Campos do Jordão	1578	14,9

Pode-se dar uma interpretação geométrica bastante prática aos resultados expressos pelo Semivariograma Cruzado por meio da Figura 4. Para tanto, considere a Figura 5, onde o ponto X_0 tomado no extremo leste paulista constitui o centro de um círculo de raio 7 graus de coordenadas geográficas. Sendo o alcance da correlação espacial entre os fenômenos, estão a X_0 inversamente correlacionados, segundo a altitude e os índices térmicos do ar, todos os pontos do círculo compreendidos na região de amostragem. Os pontos externos ao círculo não influenciam consideravelmente nas estimativas dos valores assumidos no ponto X_0 por qualquer das duas variáveis estudadas, quando este processo dá-se através de interpolação por *Cokrigagem* com a utilização das informações da correlação espacial expressas no Semivariograma Cruzado.

Também na Figura 5 fica mais nítida a grande abrangência do alcance da correlação espacial. Com respeito ao ponto X_0 considerado, há apenas um número muito pequeno de pontos amostrais, a ele não correlacionados.

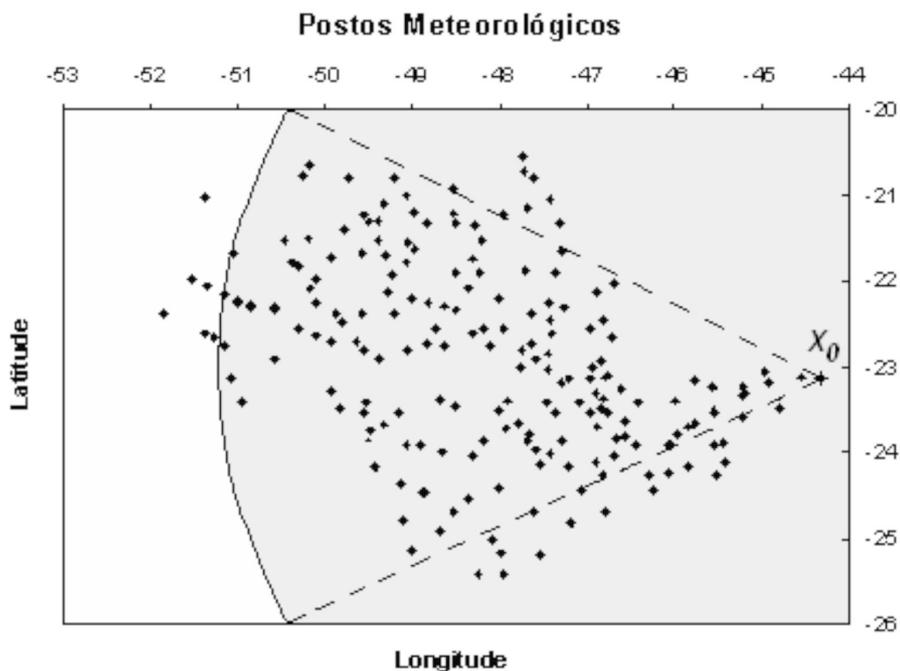


FIGURA 5 - Áreas de correlação entre a altitude e os índices pluviométricos médios

A correlação inversa que se concluiu existir entre os fenômenos estudados, é de fácil percepção e interpretação nos mapas de isolinhas das duas variáveis, gerados pelo processo de interpolação por *krigagem*. Inicia-se com o mapeamento da altitude, pois este processo gerou o mapa da Figura 6.

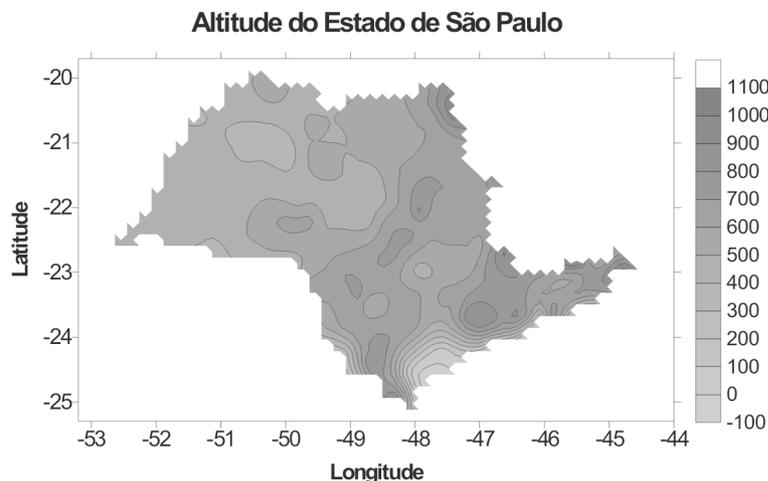


FIGURA 6 -Isolinhas da altitude (em metros) do Estado de São Paulo

Observe que as variações de altitude ocorrem de forma menos acentuada nas regiões não litorâneas do Estado, ou mais precisamente, nas regiões afastadas do litoral em mais de aproximadamente 50Km . Este fato indica que, considerando-se como exemplo o município de Adamantina, num raio de aproximadamente 50 km , em torno das coordenadas georeferenciadas do município, estatisticamente, a altitude não sofre grandes variações. O município de Adamantina está localizado, aproximadamente, nas coordenadas 21.68 graus de latitude, 51.07 graus de longitude e, 440 m de altitude, indicando uma temperatura média (série histórica de 30 anos de dados) anual de, aproximadamente, $23,18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Comparando esta

temperatura com a temperatura média do município de Presidente Prudente 22,70 °C, observa-se uma variação de 0,48 °C. Esta variação é predominante em praticamente todo o Oeste do Estado de São Paulo, como pode ser vista na Figura 7. Assim o mapa da figura 7, com um número maior de classes, facilmente traçadas, pode auxiliar um profissional da área agrícola em tomadas de decisões que podem favorecer pequenos e médios agricultores na implantação de determinadas culturas.

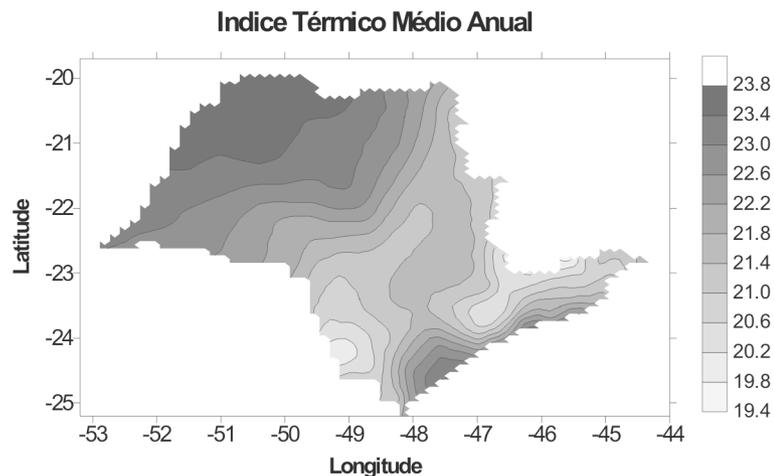


FIGURA 7 - Isolinhas do índice térmico médio anual (em °C) do estado de São Paulo

Além disso, pode-se, sem demais esforço, notar que os dois mapas apresentam zoneamentos muito semelhantes, no que se refere às compreensões geográficas. Apenas as variações dos dois fenômenos é que, como esperado, apresentam sentidos de variações opostos quando se passa de um zoneamento a outro.

Conclusão

As análises espaciais da altitude e dos índices térmicos médios do ar do estado de São Paulo permitiram uma identificação minuciosa da variabilidade espacial de cada um destes fenômenos altamente envolvidos na determinação climática. Além disso, comprovou-se que estes dois fenômenos são inversamente correlacionados e esta correlação possui um alcance bastante expressivo para a totalidade da área considerada. Com estes resultados, a variação da temperatura do ar, pode ser mais bem compreendida e sua influência climática, determinada com maior precisão em cada região do estado, o que pode gerar ganhos consideráveis, principalmente em ramos de atividades agrícolas e de manejo.

Referências

Livros

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. New York, Oxford University Press, Inc., 1997.483p.

MATHERON, G. **Principles of geostatistics. Economic geology** 58. Universität Trier, FB VI – Geomathematik. p. 1246-1266, 1963.

Tese

CARDIM, M. **Mapeamento do comportamento multivariado das principais variáveis climáticas de interesse agrícola do Estado de São Paulo**. Botucatu, 2001. 124 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura). Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Relatórios

FENILLE, M. C. & CARDIM, M. (Coordenadores) **Análise espacial de variáveis climáticas do**

Estado de São Paulo. São Paulo: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. Relatório de Iniciação Científica. 172 p., 2004.

FENILLE, M. C. & CARDIM, M. (Coordenadores) **Geoestatística multivariada aplicada em variáveis climáticas.** São Paulo: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. 113 p., 2003.

Software

FENILLE, M. C. & CARDIM, M. (Coordenadores) Varlle v. 1.0 – **Software para análises geoestatísticas.** Presidente Prudente: Unesp, 2004.