

ISSN 0104-1347

## Estratificação de efeitos anisotrópicos do relevo na geração de mapas pluviométricos por geoprocessamento

Stratification of relief anisotropic effects for the generation of rainfall maps through geoprocessing

Márcio de Morisson Valeriano<sup>1</sup>, Angélica Giarolla Picini<sup>2</sup> e Maria Helena de Almeida Mello<sup>3</sup>

**Resumo** - Funções de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) foram aplicadas à geração de mapas de precipitação pluvial média mensal, interpolados a partir de dados tabulares. Foram analisados dados de 378 postos pluviométricos do Estado de São Paulo. As análises foram feitas com os dados estratificados em duas regiões (Interior e Litoral), estabelecidas a partir de informações geomorfológicas, seguindo-se o fluxo em duas linhas paralelas. As regiões foram estabelecidas em função da predominância de alinhamentos no relevo em estruturas direcionais diferentes, e que influem de maneira anisotrópica na distribuição espacial da precipitação pluvial. Uma vez observada tendência nas duas regiões em quase todos os meses, as análises geoestatísticas foram aplicadas sobre os resíduos após a remoção das tendências. Em cada região, foram determinados os eixos principais de anisotropia para cada mês, obtendo-se dois conjuntos de parâmetros de interpolação (krigagem), para os eixos ortogonais entre si. Os dados apresentaram descontinuidade espacial de média a alta, com grande porção da variabilidade atribuída à componente aleatória. As duas imagens interpoladas de cada mês foram operadas espacialmente em Sistema de Informação Geográfica, para uma concatenação gradual das regiões, formando o todo. Os mapas ajustados apresentaram alta correlação com os valores originais, com pequeno erro médio. O controle da variabilidade espacial com as técnicas adotadas neste trabalho permitiu a interpolação livre de efeitos pictóricos (artefatos de processamento) indesejáveis.

**Palavras-chave:** cartografia digital, geoprocessamento, precipitação pluvial, krigagem, anisotropia.

**Abstract** - Geographical Information System (GIS) functions were applied to generate monthly mean rainfall maps, interpolated from tabular data. The analyses used data from 378 pluviometric stations of São Paulo State. Data were stratified into two regions (Inland and Coastland), established from geomorphological information, following a twofold analysis flux. The regions were established by their predominant topographical alignments, which are expected to cause anisotropic effects on rainfall distribution. Since linear trends were observed on the two regions for almost all months, the geostatistical analyses were carried over the residuals, after removing the trends. In each region, the main anisotropic axes for each month were selected, resulting in two sets of interpolation (kriging) parameters, for that pair of orthogonal axes. Rainfall data showed medium to high spatial discontinuity, with a high proportion of random variability. The two interpolated images for each month were operated in Geographical Information System to be smoothly matched, in order to form the whole state. A linear regression fitted to the original values was necessary, since the inclusion of the random variability in the interpolation reduced the value ranges on the mapped data. Fitted maps showed strong correlation with original data and small mean errors. The adequate control of the spatial variability with the described techniques allowed the interpolation to result free of undesirable pictorial effects (processing artifacts).

**Key words:** digital cartography, geoprocessing, rainfall, geostatistics, anisotropy

<sup>1</sup> Centro de Solos e Recursos Agroambientais - Instituto Agronômico de Campinas – CSRA/IAC. Avenida Barão de Itapura 1481, Caixa postal 28 CEP 13001-970, Campinas. Bolsista do CNPq/MCT. [valerian@iac.br](mailto:valerian@iac.br)

<sup>2</sup> Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas Zeferino Vaz –FEAGRI/UNICAMP. Caixa postal 6011 CEP13083-970 Campinas. Bolsista do CNPq [angel@iac.br](mailto:angel@iac.br)

<sup>3</sup> Centro Ecofisiologia e Biofísica - Instituto Agronômico de Campinas – CEB/IAC. Avenida Barão de Itapura 1481, caixa postal 28 CEP 13001-970, Campinas. [mhmello@iac.br](mailto:mhmello@iac.br)

## Introdução

O mapeamento geográfico de informações importantes ao empreendimento agrícola, como o balanço hídrico e a erosividade, entre outros, requer a manipulação numérica de mapas de precipitação pluvial, altamente favorecida quando operada em ambiente digital. A geração desses mapas com técnicas de geoprocessamento permite ainda que se avaliem, durante o processo, as particularidades numéricas e espaciais da variável, que caracterizarão a precisão do mapa final. As vantagens da geração de mapas em SIG (atualização automática; armazenamento de valores contínuos; edição; flexibilidade de escala; manipulação digital; metodologia objetiva; teste da precisão), a exemplo do mapeamento da temperatura feito por VALERIANO & PICINI (2001), não poderiam ser atingidas através da simples reedição dos mapas das mesmas variáveis anteriormente publicados (CAMARGO et al., 1974; MINAS GERAIS, 1980). Uma vez desenvolvida livre da subjetividade de processos interpretativos, as metodologias de geração de mapas de variáveis climáticas por geoprocessamento podem ser aplicadas em iniciativas recentes de zoneamentos similares (ARAÚJO & ASSAD, 2001; CARVALHO JR. et al., 2001; PANDOLFO et al., 2001). Com fins igualmente práticos, pesquisas recentes com dados meteorológicos em SIG (TOMMASELI et al., 1999, BALDO et al., 2000, WREGGE et al., 2001, por exemplo) lidaram com a espacialização dos dados de variadas formas.

Os programas associados aos SIG possuem uma série de recursos de interpolação para a formação de imagens numéricas a partir de dados pontuais. Embora dotados de diversos algoritmos de interpolação, grande parte dos aplicativos de SIG traz de fábrica uma configuração *default* para realizar interpolações ponderando os pontos pelo Inverso do Quadrado da Distância (IQD) em relação ao local estimado (WATSON, 1994). Ao se optar por outro interpolador (linear ou krigagem, por exemplo), este também se configura automaticamente, na falta de especificações. As configurações *default* permitem que qualquer usuário de SIG possa utilizar estes interpoladores sem que necessite tomar conhecimento do processo executado, chegando assim a seu objetivo.

Entretanto, interpolações requerem, a rigor, o conhecimento da estrutura de variabilidade espacial do conjunto de dados, sob risco de se criarem resultados indesejáveis. Há uma série de trabalhos de

pesquisa específicos para o desenvolvimento de métodos para gerar mapas de dados pluviométricos com técnicas de geoprocessamento mais confiáveis, embora menos expeditas. DIRKS et al. (1998) e BORGA & VIZZACCARO (1997) relataram o desempenho de algoritmos de interpolação para a precipitação pluvial, concluindo os últimos a superioridade da krigagem em situações de fraca densidade de dados. JEFFREY et al. (2001) elaboraram uma base digital de dados climáticos da Austrália, no qual sofisticadas técnicas de krigagem foram requeridas em especial para os dados pluviométricos.

A krigagem perfaz a estimativa dos valores da variável nos pontos de grade ponderando as observações experimentais em função do *alcance*, da *escala* e do *efeito pepita* do semivariograma, calculado com análise geoestatística (BURROUGH, 1987). O *alcance* representa o raio de influência dos pontos amostrados sobre sua vizinhança, indicado pela distância na qual a semivariância se estabiliza. O valor de interseção do semivariograma com o eixo y corresponde ao *efeito pepita*, que é a estimativa da variação espacialmente aleatória. A amplitude restante corresponde à componente espacialmente correlacionada, que será referida aqui como *escala*, de acordo com a terminologia encontrada em aplicativos de interpolação. A altura então atingida corresponde à variância máxima dos dados, englobando a variação aleatória (pepita) junto com a componente espacialmente correlacionada (escala). Dados com efeito pepita grande em relação à escala indicam a ocorrência de variações abruptas em curtas distâncias e apresentam, portanto, fortes restrições para sua interpolação e conseqüente mapeamento (VALERIANO & SANTOS, 2001). Por outro lado, a generalização cartográfica (ROBINSON et al., 1978), necessária para representar dados com excessiva aleatoriedade espacial, pode ser atingida pela incorporação deste efeito na interpolação, controlando-se assim a possibilidade de desvio das estimativas em relação aos dados observados com critério geoestatístico.

Quando a variabilidade espacial dos dados ocorrer da mesma maneira em todas as direções, o comportamento é chamado de isotrópico. Se não, é chamado anisotrópico. A isotropia ocorre em situações em que não há um controle direcional atuando na forma do padrão espacial (BURROUGH, 1987). Os dados de precipitação pluvial, enquanto relacionados ao relevo por diversos mecanismos, são tipicamente anisotrópicos, em função das formas de relevo

aliado à dinâmica das massas de ar que condicionam a ocorrência do fenômeno pluvial. A incorporação do efeito da topografia na krigagem dos dados pluviométricos tem se mostrado interessante para aumentar a fidelidade dos mapas (GOOVAERTS, 2000; WOTLING et al., 2000).

O presente trabalho se propôs a desenvolver técnicas de análise e interpolação dos dados de precipitação mensal que contemplem as diferenças de anisotropia esperadas entre diferentes domínios geomorfológicos do Estado de São Paulo, com vistas à geração de mapas básicos de confiabilidade conhecida. As características da variabilidade espacial ao longo do ano foram observadas e suas conseqüências discutidas sob o ponto de vista do geoprocessamento de informações ligadas à precipitação pluvial.

## Material e métodos

As estimativas de precipitação pluvial para os postos termo-pluviométricos do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) foram elaboradas no Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO) do Centro de Ecofisiologia e Biofísica do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), para o projeto de "Regiões Agroecológicas para reorganização da cafeicultura no Estado de São Paulo", vinculado ao Programa Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (PNP&D/Café).

Foram utilizados os seguintes aplicativos computacionais para a execução deste trabalho: Surfer e Idrisi (geoprocessamento); Excel e QuattroPro (planilhas); MINITAB (estatística tabular); VarioWin (geoestatística); PaintBrush (editor gráfico) e Word (texto). Durante o processamento dos dados foram gerados programas de lote para aplicar repetidamente as principais funções sobre a totalidade dos dados. Através destes, os principais passos do processamento podem ser repetidos sob especificações cartográficas diferentes daquelas adotadas neste trabalho.

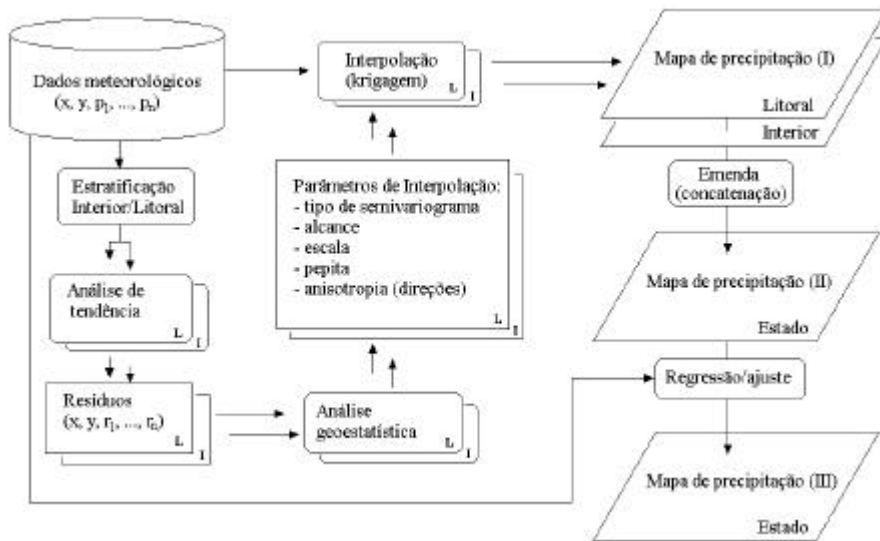
Os dados de 378 postos pluviométricos do DAEE (1962 a 1992) foram estruturados em arquivo de registros do tipo  $x, y, z_1, z_2, \dots, z_n$ , onde  $x, y$  são as coordenadas geográficas e  $z_1-z_{12}$  as precipitações pluviométricas mensais dos meses de janeiro a dezembro. As análises seguiram um fluxo duplo, com os dados estratificados em duas regiões (*Interior* e *Litoral*) até que as duas imagens interpoladas de cada mês fossem concatenadas (Figura 1). O fluxo foi desenvolvido em função das demandas observadas nos re-

sultados, as quais eram incorporadas e os testes repetidos, até que se atingissem resultados aceitáveis.

As duas regiões, estabelecidas em estudo anterior (VALERIANO & PICINI, 2001) apresentam geomorfologia distinta (ROSS & MOROZ, 1997). Os dados de precipitação pluvial, por sua vez, são reconhecidamente influenciados pela topografia. O efeito orográfico de terrenos montanhosos é promover a ascensão do ar, favorecendo a condensação através de resfriamento adiabático. Este efeito foi considerado a priori na estratificação dos dados segundo sua localização no Interior ou no Litoral. Na Figura 2 estão localizados os postos utilizados e sua estratificação nas duas regiões.

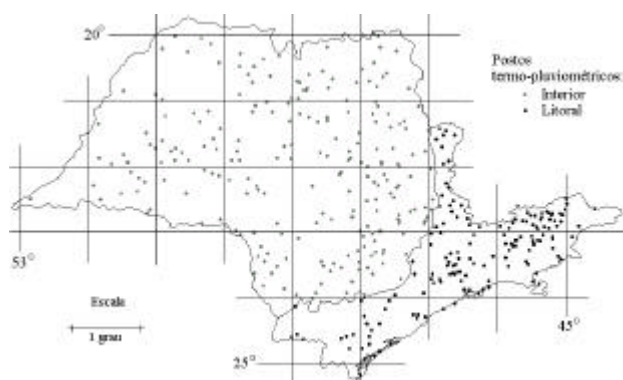
A região do *Interior* (Bacia Sedimentar do Paraná), conforme definida, é caracterizada pelos vales dos rios Mogi-Guaçu, Pardo, Turvo, Tietê, Aguapeí, do Peixe e Paranapanema. Estes rios correm no sentido noroeste, predominando esta orientação, embora se possa considerar sua disposição ligeiramente radial partindo do centro do Estado. A conformação da topografia segue esta disposição, com um leque de divisores de água entre estes leitos. A região do *Litoral* foi estabelecida como o restante do Estado, constituindo-se principalmente do Cinturão Orogênico do Atlântico, englobando as Bacias Sedimentares Cenozóicas e Depressões Tectônicas. Nesta região, a morfologia apresenta orientação predominantemente a nordeste, do Planalto de Paraitinga e Paraibuna ao de Serra Negra e Lindóia, assim como nos Planaltos de Jundiá e São Roque. A Depressão do Médio Paraíba e as Planícies Litorâneas seguem esta conformação. Das grandes feições desta região, somente o Planalto de São Paulo e a depressão do Baixo Ribeira apresentam configuração isotrópica. As diferenças estruturais e de orientação do relevo entre esses compartimentos geomorfológicos sugerem graus e direções diferentes de anisotropia. Por isso, foram confeccionados semivariogramas direcionais com VarioWin (PANNATIER, 1996) para a seleção dos sistemas de eixos de anisotropia para cada condição pressuposta. Seleccionadas as direções, as análises geoestatísticas foram aplicadas definitivamente para a determinação dos parâmetros de interpolação.

Nas análises preliminares, foi observada tendência geográfica em quase todas as condições, havendo, portanto, a necessidade de se aplicar a análise geoestatística aos resíduos, quando da determinação dos parâmetros de krigagem a serem utilizados. WOTLING et al. (2000) enfatizam esta necessidade como característica dos dados de precipitação pluvi-



**Figura 1.** Fluxo de dados para o mapeamento da precipitação pluvial média mensal.

al. Numa primeira série de análises, selecionaram-se os eixos direcionais com base na semelhança/diferença entre semivariogramas correspondentes aos eixos ortogonais dos sistemas N-S/L-W e NE-SW/NW-SE. Havendo semelhança cruzada, elegeram-se ainda direções equivalentes aos dois sistemas de eixos ortogonais intermediários a estes. Os parâmetros de krigagem anisotrópica encontrados para cada região foram aplicados na interpolação em Surfer (GOLDEN SOFTWARE, 1995) de todos os dados, formando-se duas imagens do Estado para um mesmo mês. Importadas ao SIG Idrisi (EASTMAN, 1995), estas imagens foram emendadas através da soma ponderada das partes correspondentes, com um gradiente ao longo de uma distância de 1° (pelo sistema de coor-



**Figura 2.** Localização dos postos termo-pluviométricos do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) no Estado de São Paulo.

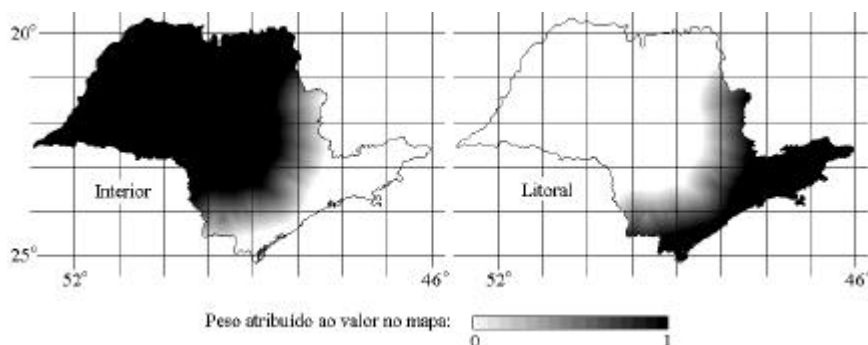
denadas geográficas) em torno do limite entre as duas regiões (mapas da Figura 3). Esta técnica contornou efeitos pictóricos indesejáveis (artefatos) produzidos por eventuais contrastes entre as duas regiões, o que nos testes realizados produziu feições angulosas no limite.

A interpolação dos dados foi realizada mediante um programa de lote que contém nas suas linhas de comando todos os parâmetros geoestatísticos encontrados, controlando o fluxo de operações, os dados de entrada e os arquivos de armazenamento dos resultados. Além da vantagem

operacional de não se repetirem manualmente os procedimentos, a programação das interpolações permite que o mesmo cálculo seja feito sobre uma outra especificação cartográfica de escala de mapa, área mapeada, resolução espacial e testes de alteração em parâmetros. Outra vantagem logo percebida foi a possibilidade de se localizarem (e corrigirem) erros dentro de uma longa lista de operações. Formadas as imagens de todo o Estado, verificou-se a necessidade de ajuste dos valores mapeados em relação aos dados originais. Equações de regressão foram aplicadas sobre as imagens totais e os resultados dessa análise serviram de base para a avaliação final da qualidade dos mapas. Os mapas foram gerados na forma de superfície numérica de variação contínua, sob resolução de 0,01° (lat/long). Para apresentação visual de todo o conjunto, os mesmos foram classificados de 25mm em 25mm, resultando nas faixas de variação dos mapas apresentados no resultado.

### Resultados e discussões

As amostras se evidenciaram como sendo provenientes de populações com distribuição lognormal. Tais amostras foram submetidas à análise de regressão multivariada aplicadas aos valores totais médios mensais de precipitação pluvial de cada ponto em relação às suas coordenadas cartesianas. Devido à necessidade de repetição desse tipo de análise aplicada à amostras das duas regiões, elaborou-



**Figura 3.** Distribuição dos pesos aplicados na somatía entre as imagens interpoladas com modelos diferentes para o Litoral e o Interior.

se um programa para essa finalidade, o qual armazenou em arquivo as 24 equações encontradas, ordenadas conforme respectivas superfícies de tendência mensal da Figura 4.

As direções, gradientes e significâncias das tendências mostraram variações ao longo do ano. Observou-se tendência fraca ou ausente durante o mês de outubro, nas duas regiões indistintamente. A significância da tendência se relaciona com a significância da latitude utilizada como estimador. Frequentemente, a longitude se evidenciou como não-significante. No *interior*, os meses de abril e outubro corresponderam a fases de transição, em torno da qual a tendência se inverteu; no inverno, o gradiente indicou maior pluviosidade ao Sul do Estado. No verão ocorreu o inverso, ou seja, o padrão foi menos evidente no *litoral*, tendo sido os coeficientes de correlação coerentemente mais fracos, observando-se tendência invertida em novembro/dezembro.

Para cada uma das regiões, os valores de precipitação foram subtraídos dos respectivos valores de tendência, obtidos através das equações que constam na Figura 4, resultando em dois conjuntos mensais de séries de resíduos. As análises geoestatísticas feitas sobre estas séries determinaram os parâmetros geoestatísticos dos semivariogramas teóricos ajustados para as duas regiões, os respectivos tipos de modelos e a indicação de suas direções (Tabela 1).

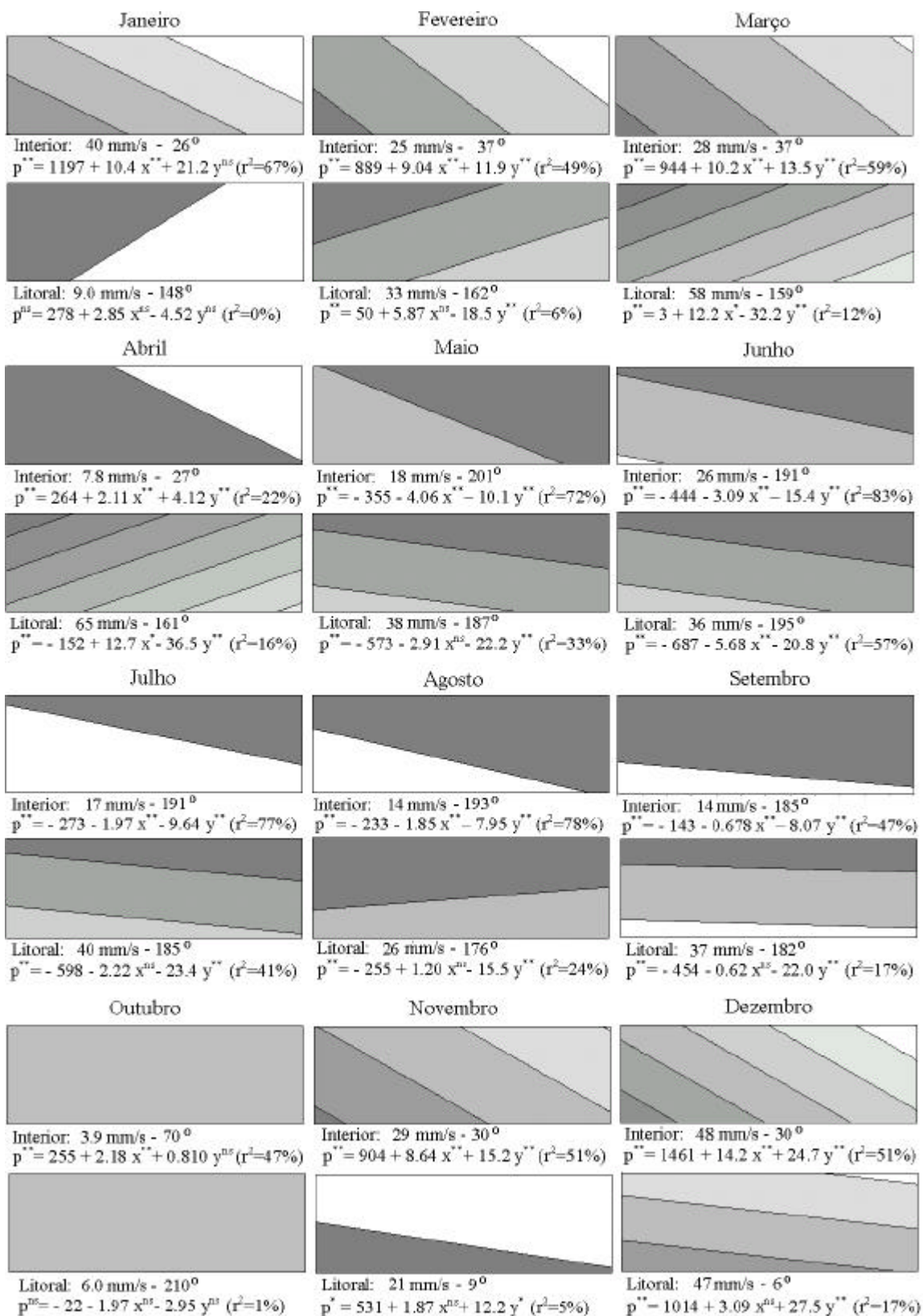
No *interior*, com exceção dos meses de julho, agosto, outubro e dezembro, os semivariogramas apresentaram grandes diferenças de proporção entre as escalas de direções ortogonais. Os valores de pepita mostraram-se relativamente altos, indicando uma forte componente aleatória. Casos extremos podem ser exemplificados pelos meses de janeiro, junho e setembro (direção =  $0^\circ$ ). Nestes dois últimos, as diferenças de escala entre as direções e as respec-

tivas ortogonais evidenciaram a acentuada anisotropia desta componente. De modo geral, **na região do litoral**, os semivariogramas mostraram maior proporção da escala em relação à pepita. Maiores pepitas (e menores escalas) predominaram na direção  $157,5^\circ$ . Estes resultados parecem estar relacionados com o controle da variabilidade devido à orientação geral da topografia, em que predominam alinhamentos na

direção  $67,5^\circ$ . Coerentemente, os semivariogramas em torno da direção desses alinhamentos ( $67,5^\circ$ ) mostraram as menores pepitas. Somente no *litoral*, de abril a dezembro, não foi possível interpretar o gráfico da semivariância, sendo então necessário usar o inverso da covariância como estimador do semivariograma. Na direção de  $157,5^\circ$ , observou-se um forte “efeito buraco” (um pico na variância experimental, em torno do alcance), que dificulta o ajuste de um modelo teórico ao semivariograma.

Os histogramas das imagens formadas mostraram amplitude mais estreita do que aquela dos dados originais, de certa forma esperado, pela operação de interpolação resultar na criação de valores intermediários. Este efeito deve ter sido intensificado devido à inclusão da componente aleatória, que promove um desvio da interpolação em relação a pontos medidos em função dos valores de sua vizinhança. Recorreu-se à análise de regressão para avaliar possibilidades de ajuste e determinar equações para correção dos mapas. Coerentemente, os coeficientes angulares resultaram todos acima de 1.0 (de 1.05 a 1.30), o que amplia a variação calculada, enquanto que as constantes foram todas negativas, o que reduz o valor mínimo. Os coeficientes de determinação, apresentados na verificação da Figura 5, indicam ter havido pouca dispersão dos dados, permanecendo em torno de 90% (de 84% a 94%).

Os erros médios mostraram-se pequenos em relação ao valor médio de cada mês. O maior erro médio absoluto foi de 18mm no mês de dezembro, o que corresponde a aproximadamente 8% da média mensal (234mm). Os erros médios e as percentagens da determinação, apresentados nos diagramas de dispersão da Figura 5, se referem à precisão dos mapas apresentados na Figura 6. A dispersão dos dados mostrou que os valores de máximo de precipitação



**Figura 4.** Tendência geográfica dos dados de médias mensais de precipitação pluvial do Estado de São Paulo nas duas regiões consideradas: gradiente (mm/s), direção (graus) e significância dos termos da equação (\*\*: 1%; \*: 5%; e ns: não significativo). Níveis de brilho proporcionais à precipitação (branco=máximo).

**Tabela 1.** Parâmetros geoestatísticos<sup>1</sup> dos resíduos à tendência linear dos dados de precipitação pluvial média mensal, com anisotropia nos eixos direcionais selecionados

Mês	Interior					Litoral <sup>2</sup>				
	Direção	Tipo <sup>3</sup>	Alcance	Escala	Pepita	Direção	Tipo	Alcance	Escala	Pepita
jan	22,5°	exp	3,384	0,39	0,69	67,5°	gau	0,510	0,73	0,44
	112,5°	gau	1,116	0,26	0,84	157,5°	esf	0,540	1,00	0,20
fev	22,5°	esf	3,024	0,42	0,66	67,5°	gau	0,510	0,76	0,40
	112,5°	esf	1,260	0,55	0,60	157,5°	esf	0,570	1,00	0,19
mar	45°	gau	1,040	0,41	0,64	67,5°	esf	0,630	1,00	0,24
	135°	esf	0,972	0,62	0,45	157,5°	gau	0,465	1,00	0,19
abr	67,5°	esf	1,656	0,41	0,66	67,5°	esf	0,510	1728	945
	157,5°	esf	1,008	0,64	0,42	157,5°	esf	0,555	1431	1296
mai	67,5°	esf	1,872	0,61	0,55	67,5°	esf	0,600	569	190
	157,5°	gau	1,512	0,36	0,69	157,5°	gau	0,495	299	445
jun	0°	gau	1,512	0,26	0,80	67,5°	gau	0,480	186	111
	90°	esf	1,800	0,82	0,49	157,5°	esf	0,510	159	150
jul	67,5°	gau	1,656	1,00	0,40	67,5°	gau	0,480	360	185
	157,5°	esf	2,376	0,85	0,25	157,5°	gau	0,495	212	333
ago	22,5°	exp	1,692	0,67	0,43	67,5°	gau	0,420	292	109
	112,5°	exp	1,512	0,63	0,46	157,5°	esf	0,600	183	226
set	0°	esf	2,16	0,41	0,76	67,5°	esf	0,510	1080	435
	90°	exp	1,58	0,85	0,35	157,5°	gau	0,525	465	1020
out	67,5°	esf	1,944	0,73	0,43	67,5°	esf	0,510	1360	700
	157,5°	esf	1,296	0,73	0,34	157,5°	esf	0,600	920	1120
nov	22,5°	gau	1,836	0,84	0,44	67,5°	esf	0,480	1456	792
	112,5°	gau	1,260	0,56	0,56	157,5°	esf	0,450	1320	880
dez	0°	esf	2,088	0,79	0,31	67,5°	gau	0,450	1430	1196
	90°	esf	1,692	0,86	0,40	157,5°	gau	0,285	1794	831

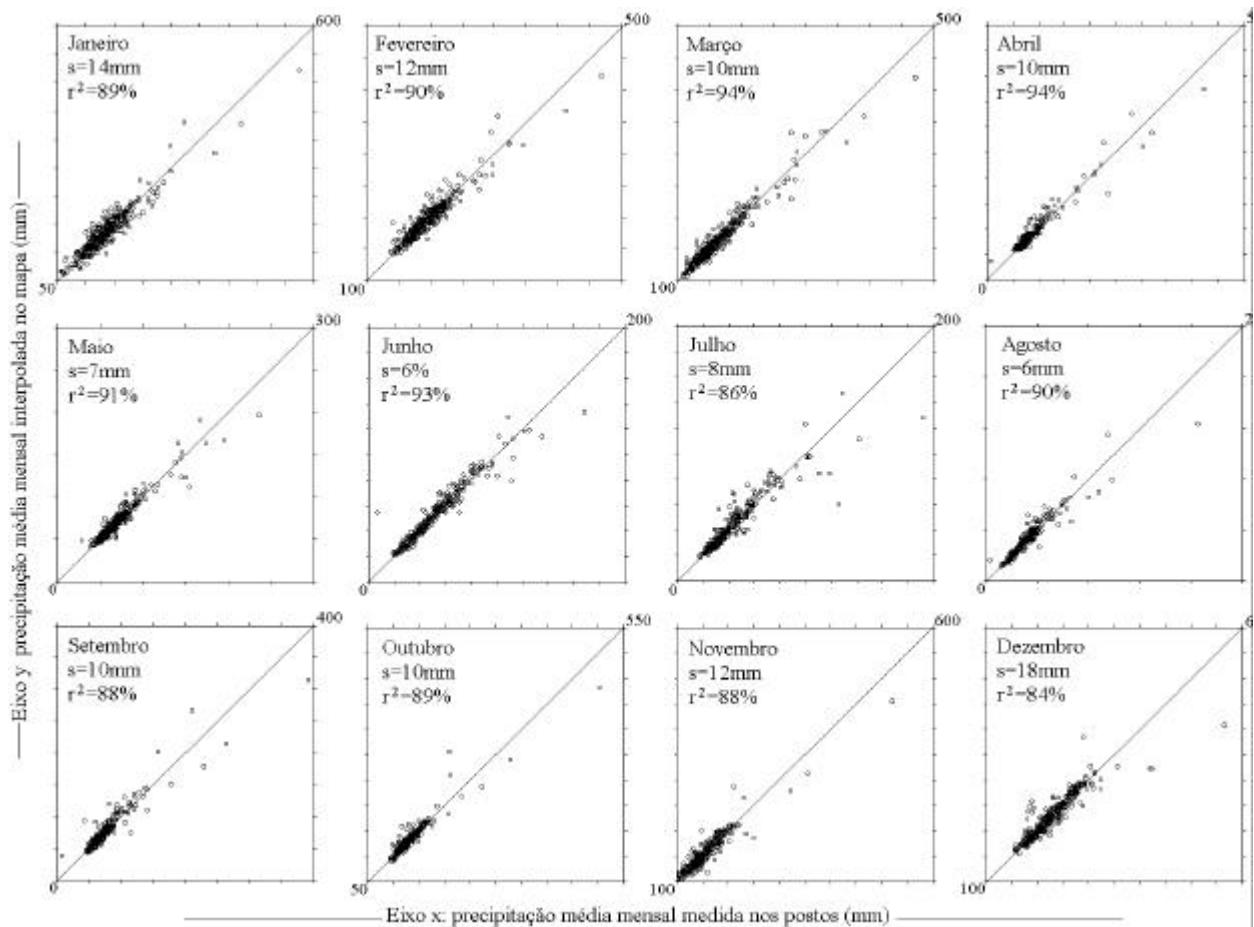
(<sup>1</sup>) modelos obtidos com semivariância escalonada; (<sup>2</sup>) no *Litoral*, a partir de abril, foi utilizado como estimador do semivariograma o inverso da covariância; (<sup>3</sup>) tipo do modelo teórico de semivariograma ajustado (exp: exponencial; gau: gaussiano e esf: esférico).

pluvial de cada mês foram sistematicamente subestimados no mapeamento. O mesmo não ocorreu com os valores de mínimo, podendo-se explicar tal diferença pela distribuição lognormal dos dados, assimétrica para valores baixos. Nesta condição de assimetria, cada amostra com valor de máximo local têm numerosos vizinhos de valor inferior.

A distribuição geral dos valores de precipitação pluvial (Figura 6) mostrou-se compatível com as tendências observadas nas análises preliminares (Figura 4), apresentando inversões semelhantes ao longo dos meses. Para comparação, foram geradas com os dados de janeiro três imagens similares de pluviometria com os interpoladores Linear, Inverso do Quadrado da Distância (IQD) e Krigagem Linear Isotrópica, amplamente usados (Figura 7).

Os três algoritmos usados na comparação (Figura 7) são isotrópicos, bem como consideram os dados isentos de aleatoriedade. Por este último as-

pecto, os mapas assim gerados apresentaram excessivo detalhamento nas isolinhas, com evidente necessidade de generalização cartográfica. O interpolador linear mostrou-se particularmente inaceitável ao expressar este efeito em isolinhas geométricas irreais. A inclusão do efeito pepita na operação de interpolação mostrou-se uma forma criteriosa de generalização, removendo os freqüentes picos e vórtices observados na Figura 7, em conformidade com as verificações de VALERIANO & SANTOS, 2001. A supressão da anisotropia causou o aparecimento de numerosas formas concêntricas em torno dos postos de coleta, principalmente para o IQD, com um fundo médio de valor relativamente constante em torno destes. A incorporação da anisotropia resultou em contornos de classes harmoniosos com a topografia, diferentemente para as duas regiões, reduzindo a coalescência dos valores de postos que, embora próximos, pertençam a áreas geomorfológica e climaticamente distintas.



**Figura 5.** Verificação dos dados de precipitação pluvial medidos e mapeados, erro médio (s) e percentagem da determinação ( $r^2$ , em %).

## Conclusões

- Os dados pluviométricos dos postos que compõem a rede de observações do DAEE apresentam variabilidade espacial marcada por tendência geográfica, grande componente aleatória e por anisotropia diferenciada entre as duas regiões estabelecidas, Interior (Bacia Sedimentar do Paraná) e Litoral.
- A interpolação por krigagem anisotrópica permite a obtenção de imagens coerentes com as análises de tendência e em conformidade com feições geomorfológicas. As expressivas mudanças sazonais do comportamento espacial da precipitação pluvial indicam ser recomendável a operação entre os dados através da integração dos mapas (para cálculos como erosividade e balanço hídrico, por exemplo) após a espacialização de cada variável pluviométrica individualmente e não antes.

- A inclusão do efeito pepita no procedimento de interpolação causa um efeito necessário de generalização cartográfica na imagem gerada, minimizando ou suprimindo efeitos indesejáveis de interpolação como picos e vórtices. Os procedimentos desenvolvidos mostram-se capazes de contornar os principais problemas de espacialização do conjunto de dados de pluviometria, com reflexo positivo nos coeficientes de correlação verificados com relação aos dados originais.

## Agradecimentos

Agradecemos a Orivaldo Brunini (Diretor do Centro de Ecofisiologia e Biofísica/IAC) pelo fornecimento dos dados pluviométricos e ao DAEE pela ines-



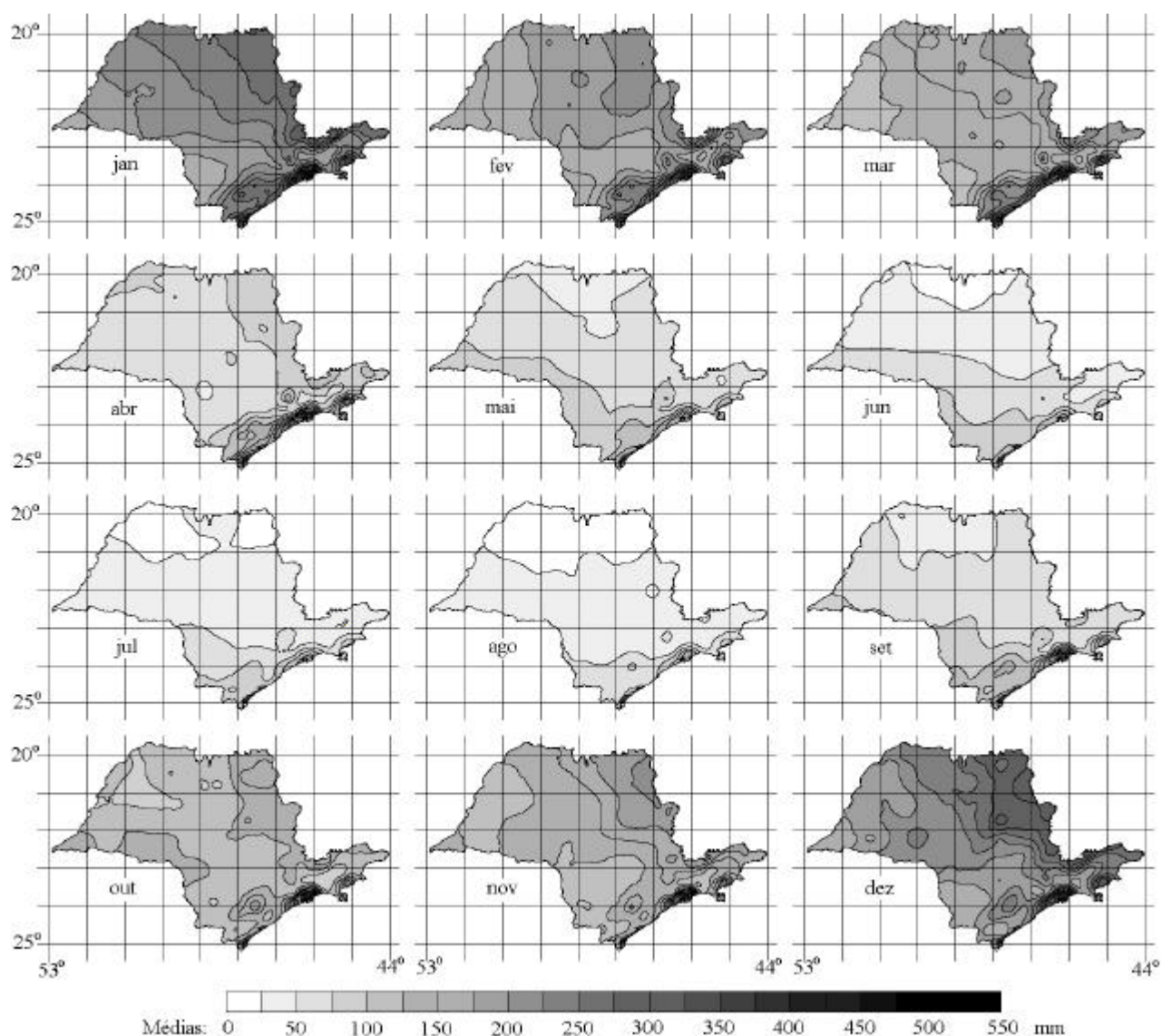
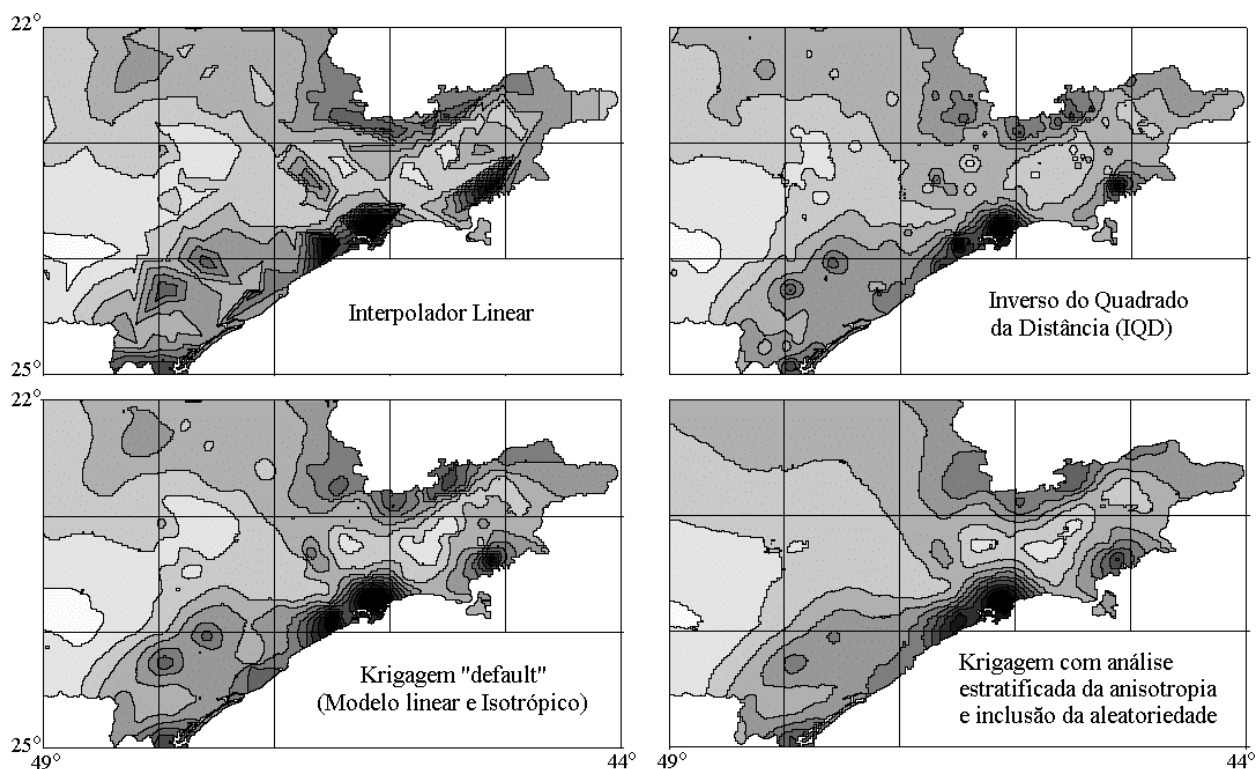


Figura 6. Mapas de precipitação pluvial média mensal do Estado de São Paulo

timável tarefa de administração e manutenção da rede pluviométrica do Estado de São Paulo e pela disponibilização dos dados.

#### Referências bibliográficas

- ARAÚJO, A.G.; LOPES ASSAD, M.L. Zoneamento Pedoclimático por Cultura a Partir de Levantamento de Solos de Baixa Intensidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa (MG), v. 25, n. 1, p. 103-111, 2001.
- BALDO, M.C. et al. Análise da precipitação pluvial do Estado de Santa Catarina associada com a anomalia da temperatura da superfície do oceano Pacífico. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 8, n. 2, p. 283-293, 2000.
- BORGA, M.; VIZZACCARO, A. On the interpolation of hydrologic variables: formal equivalence of multiquadratic surface fitting and krigging. **Journal of Hydrology**, v. 195, n. 2, p. 160-171. 1997.
- BURROUGH, P.A. Spatial aspects of ecological data. In: JONGMAN, R.H. et al. **Data analysis in community and landscape ecology**. Wageningen, Netherlands: Pudoc (Ed.), 1987. p. 213-251,
- CAMARGO, A.P. et al. Clima do Estado de São Paulo. In: SÃO PAULO. **Zoneamento Agrícola do Estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria da Agricultura, 1974. 80 p.
- CARVALHO JÚNIOR, W. et al. Zoneamento Pedoclimático do Estado do Paraná para cultura do arroz. In: XXVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE



**Figura 7.** Detalhe de mapas de precipitação pluvial média mensal (janeiro) do Estado de São Paulo obtidos com diferentes métodos de interpolação.

CIÊNCIA DO SOLO, 22., 2001, Londrina, PR. **Resumos...**, Londrina: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2001. p. 239.

DIRKS, K.N. et al. High-resolution studies of rainfall on Norfolk Island Part II: Interpolation of Rainfall Data. **Journal of Hydrology**, v. 208, n. 2, p. 187-193. 2000.

EASTMAN, J.R. **Idrisi for Windows : user's guide**. Worcester: Clark University, 1995. 440p.

GOLDEN SOFTWARE. Surfer Version 6.01- Surface Mapping System. [S.L.]: Golden Software, Inc. 1995. Não paginado.

GOOVAERTS, P.A. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. **Journal of Hydrology** v. 228, n. 1-2, p. 113-129. 2000.

JEFFREY, S.J. et al Using spatial interpolation to construct comprehensive archive of Australian climate data. **Environmental Modelling & Software**, v. 16, n. 4, p. 309-330. 2001.

MINAS GERAIS. Secretaria da Agricultura de Minas Gerais. **Zoneamento Agroclimático do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: secretaria da Agricultura, 1980. 114 p.

PANDOLFO, C. et al. Atlas climatológico do Estado de Santa Catarina. In: REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 3./CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 12., 3-6 de julho de 2001, Fortaleza, CE. **Resumos...**, Fortaleza: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia. 2001, Volume I, p. 11-12.

PANNATIER, Y. **VarioWin: Software for Spatial Data Analysis in 2D**. New York: Springer-Verlag, NY, 1996.

ROBINSON, A.H. et al. Processing and generalizing geographical data. In: ROBINSON, A. H. et al. **Elements of Cartography**. New York: John Wiley (Ed.), p. 106-136, 1978.

ROSS, J.L.S.; MOROZ, I. C. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: FFLCH/USP e IPT/FAPESP, 1997. (Mapas e Relatório).

TOMMASELLI J.T.G.; FREIRE, O.; CARVALHO, W. A. Erosividade da chuva da região oeste do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 7, n. 2, p. 283-293, 1999.

VALERIANO, M. de M.; PICINI, A. G. Uso de Sistema de Informação Geográfica para a geração de mapas de médias mensais de temperatura do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, RS, v. 8, n. 2, p. 255-262. 2000.

variabilidade aleatória. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28., 2001, Londrina, PR. **Resumos...**, Londrina: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2001. p. 286-286.

WATSON, D.F. Contouring: A Guide to The Analysis and Display of Spatial Data. **Computer methods in The Geosciences**, S.L.: Elsevier Science, v. 10, 1994.

WOTLING, G. et al. Regionalization of extreme precipitation distribution using the principal

components of the topographical environment. **Journal of Hydrology**, v. 233, n. 1, p. 86-101. 2000.

WREGE, M. et al. Risco de deficiência hídrica no espigamento do trigo semeado em diferentes épocas no Paraná. In: REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 3./ CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 12., 3-6 de julho de 2001, Fortaleza, CE. **Resumos...**, Fortaleza: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2001, volume I, p. 221-222.