



XIV ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE

KRIGAGEM ORDINÁRIA DA VARIABILIDADE E DEPENDÊNCIA TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO MENSAL NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ

Tamires Lima da Silva¹ ; Rodrigo Máximo Sánchez-Román² & Diego Augusto de Campos Moraes³

RESUMO: *A precipitação é um fenômeno aleatório que apresenta variabilidade espacial e temporal, sendo a principal forma de entrada de água em uma bacia hidrográfica. A krigagem ordinária, que é um método geoestatístico de interpolação, é amplamente empregada em estudos sobre a variabilidade espacial da precipitação, podendo também ser utilizada em análises quanto a sua variabilidade e dependência ao longo do tempo. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a variabilidade e a dependência temporal da precipitação mensal nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ) no período de 1980 a 2019, utilizando o método geoestatístico krigagem ordinária. Os resultados indicaram que nas bacias PCJ, a precipitação mensal possui alta dependência temporal, com alcance de 6,98 meses, apresentando a seguinte variabilidade temporal: um período seco, que se inicia no mês de maio e se estende até o mês de setembro (6 meses), e um período chuvoso, que se inicia no mês de outubro e se estende até o mês de abril (7 meses). Portanto, no planejamento do uso dos recursos hídricos das bacias PCJ, deve-se definir estratégias para o enfrentamento desse longo período com baixas precipitações mensais, inferiores a 83 mm, a fim de garantir a segurança hídrica para os múltiplos usuários.*

Palavras-Chave – planejamento de recursos hídricos; precipitação pluviométrica; dependência temporal.

INTRODUÇÃO

As bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ) é uma unidade de gerenciamento de recursos hídricos interestadual, estando majoritariamente localizada no estado de São Paulo, apresentando uma pequena porção pertencente ao estado de Minas Gerais. De acordo com a classificação das bacias hidrográficas do estado de São Paulo, a porção paulista das bacias PCJ corresponde à Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 5-UGRHI 5 (SIGRH, 2020), enquanto a porção pertencente à Minas Gerais corresponde à Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos dos rios Piracicaba e Jaguari PJ1-UPGRH PJ1, segundo a classificação das bacias hidrográficas do estado de Minas Gerais (IGAM, 2016). É uma unidade de gerenciamento dos recursos hídricos que apresenta muitos desafios relacionados tanto quanto a qualidade da água como sua disponibilidade para atender os diversos usos preponderantes.

O volume de água precipitado é a principal entrada de água em uma bacia hidrográfica, como a ocorrência de precipitação é um fenômeno aleatório que apresenta variabilidade espacial e temporal, a modelagem da sua ocorrência, baseada em dados pluviométricos, ao longo do ano é essencial para garantir a disponibilidade hídrica aos setores usuários.

1) Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA), Unesp, Campus Botucatu: Av. Universitária, N° 3780, altos do Paraíso, Botucatu, SP, 14 98138-6020, tamires.l.silva@unesp.br

2) Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA), Unesp, Campus Botucatu: Av. Universitária, N° 3780, altos do Paraíso, Botucatu, SP, 14 3880-7632, rodrigo.roman@unesp.br

3) Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA), Unesp, Campus Botucatu: Av. Universitária, N° 3780, altos do Paraíso, Botucatu, SP, 14 99791-7575, diego.c.moraes@unesp.br

O uso da geoestatística, principalmente o método de interpolação “krigagem ordinária” é bastante difundido em estudos que buscam analisar séries temporais de precipitação com o intuito de modelá-la, verificando sua variabilidade no espaço e no tempo, sendo a verificação da variabilidade temporal menos explorada. Na krigagem ordinária, o processo de estimativa de uma variável não amostrada é realizado com base na combinação linear dos valores vizinhos. Por exemplo, na verificação da variabilidade temporal de dados de precipitação amostrados, analisa-se o gráfico chamado de variograma, o qual representa quantitativamente a variação do fenômeno de precipitação regionalizada ao longo do tempo, observando-se nele a variância dos dados amostrais, que podem ser separados em intervalos de dias, meses ou anos. A qualidade da interpolação dos dados, por sua vez, pode ser obtida por meio da análise do gráfico de validação cruzada, esse gráfico representa a previsibilidade dos modelos teóricos em estimar as amostras. Para tal, um valor da amostra é retirado e por meio do método de interpolação, o valor deste ponto é estimado. Esse processo repete-se para todos os dados amostrais.

Neste contexto, este trabalho teve como objetivo estudar a variabilidade e a dependência temporal da precipitação mensal nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ), utilizando o método geoestatístico de interpolação krigagem ordinária.

MATERIAL E MÉTODOS

As bacias PCJ apresentam área de drenagem de aproximadamente 15.378 km², sendo que cerca de 92,5% dessa área localiza-se no estado de São Paulo e apenas 7,5% é pertencente ao estado de Minas Gerais. A bacia está entre os meridianos 46° e 49° O e latitudes 22° e 23,5° S, apresentando extensão aproximada de 300 km no sentido Leste-Oeste e 100 km no sentido Norte-Sul (Figura 1). Segundo a classificação climática de Köppen, as bacias PCJ estão localizadas em clima subtropical úmido (C), sendo dividida em quatro tipos climáticos: Cfa (subtropical sem estação seca e com verão quente), Cfb (clima subtropical sem estação seca e com verão ameno), Cwa (clima subtropical com inverno seco e verão quente) e Cwb (clima subtropical com inverno seco e com verão ameno) (AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ, 2018).

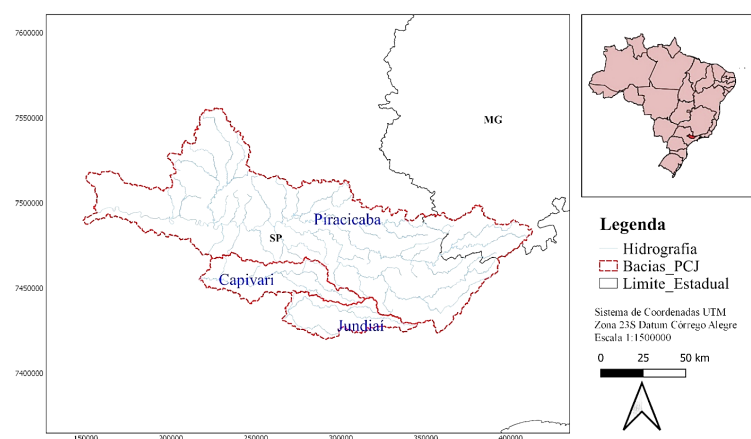


Figura 1- Localização das bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá.

Fonte: autores (2022)

Os dados de precipitação das bacias PCJ foram obtidos do banco de dados hidrológicos do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) (DAEE, 2020), que é uma autarquia do estado de São Paulo. Foram selecionadas 20 estações pluviométricas que apresentavam poucas falhas (ausência de dados) para a precipitação mensal no período de 1980 a 2019 (40 anos). Segundo o DAEE (2020), as alturas mensais de chuva são as acumuladas entre 7 horas do último dia do mês anterior até às 7 horas do último dia do mês. A unidade de medida adotada é o milímetro. A Figura 2 apresenta a localização das estações pluviométricas selecionadas.

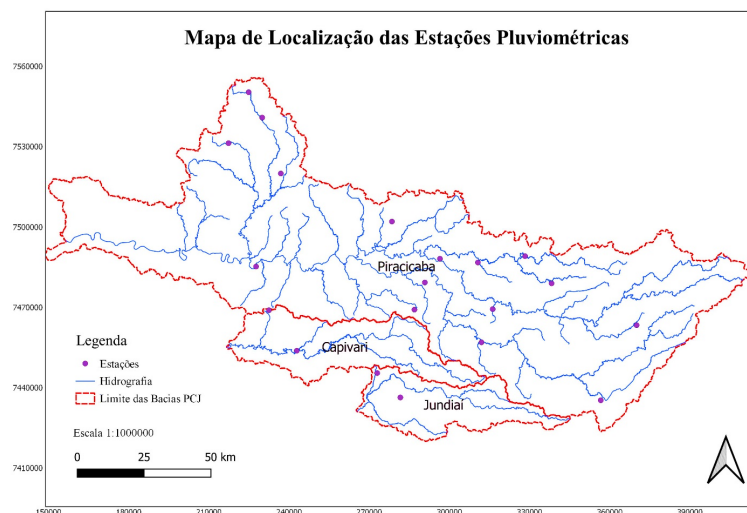


Figura 2-Mapa de localização das estações pluviométricas

Fonte: autores (2022)

O preenchimento de falhas presentes no banco de dados da série histórica de precipitação mensal (1980-2019) foi realizado por meio da aplicação do método de Regressão Linear Múltipla (RLM) (Equação 1), seguindo-se as recomendações presentes em Brubacher *et al.* (2020) que utilizaram as seguintes premissas: o coeficiente de correlação linear (r) deve ser igual ou superior à 0,6; na estimativa, deve-se utilizar dados de no mínimo três estações vizinhas, não podendo a distância entre elas ser superior à 100 km. Os cálculos de RLM foram realizados pelo programa Minitab®.

$$Y = \beta_0 + \beta_1.X_1 + \beta_2.X_2 + \beta_i.X_i + \varepsilon_0 \quad (1)$$

Em que: Y é a variável dependente (precipitação a ser estimada), $X_1, X_2, \dots, X_i$, são as variáveis independentes (estações pluviométricas vizinhas); $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_i$, são os coeficientes da regressão; e ε indica o erro residual.

A adequabilidade dos dados estudados às técnicas geoestatísticas foi verificada por meio de uma análise exploratória dos dados, sendo calculados o desvio-padrão, a média, a mediana, o valor mínimo e máximo e os coeficientes de variação, assimetria e curtose da série histórica.

A análise geoestatística da variabilidade temporal dos dados de precipitação mensal registrados entre 1980 e 2019 nas bacias PCJ, foi realizada utilizando-se o programa GS+® versão 7.0, sendo as variâncias presentes no variograma calculadas conforme a Equação 2.

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

Em que: $\gamma(h)$ é a variância para um vetor h (meses), $N(h)$ é o número de pares experimentais de observações $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$, separados por um vetor h (meses).

Dos valores calculados de $\gamma(h)$, um modelo matemático teórico (linear, esférico, exponencial ou gaussiano) foi ajustado e os componentes do variograma estimados pelo modelo teórico foram obtidos, sendo eles: efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C$), alcance (A_0) e componente estrutural (C). Os seguintes critérios foram considerados no processo de escolha do melhor modelo ajustado: maior coeficiente de determinação (R^2), menor valor da soma dos quadrados dos resíduos (SQR), e maior coeficiente de regressão do gráfico da validação cruzada (valores observados *versus* valores estimados).

A verificação da dependência temporal dos dados foi realizada por meio do cálculo e observação do índice de dependência espacial (IDE) (Equação 3) conforme recomendações de



Zimback (2001), que definiu o IDE como a proporção da componente estrutural (C), em relação ao patamar ($Co + C$). Os resultados das proporções obtidas foram interpretados como: (a) $IDE < 0,25$ fraca dependência temporal; (b) $IDE \leq 0,25 < 0,75$ moderada dependência temporal; (c) $IDE \geq 0,75$ forte dependência temporal.

$$IDE = \frac{C}{Co + C} \quad (3)$$

Em que: C é a componente estrutural do variograma; $Co + C$ é o patamar e $IDE < 0,25$ = fraca dependência espacial; $IDE \leq 0,25 < 0,75$ = moderada dependência espacial e $IDE \geq 0,75$ = forte dependência espacial.

Na interpolação dos dados de precipitação mensal da série histórica (1980-2019) para a verificação da variabilidade temporal, foi utilizado o método geoestatístico de krigagem ordinária (Equação 4) e o programa geoestatístico *GS+*® versão 7.0.

$$Z_{Ko}(x_o) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (4)$$

Em que: O valor da variável de interesse em um ponto não amostrado (x_o) é calculado como uma combinação linear dos pontos de dados vizinhos ($Z(x_i)$, $i=1, n$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise descritiva dos dados de precipitação da série histórica (1980-2019) estão apresentados na Tabela 1. O coeficiente de assimetria (Cs) indica uma curva normal não muito assimétrica, com distribuição assimétrica positiva. O coeficiente de assimetria (Ck) indica que a curva é mesocúrtica, ou seja, apresenta grau de “achatamento” ou grau de curtose igual ao da curva normal (distribuição normal). Com base nos limites do coeficiente de variação (Cv) propostos por Warrick & Nielsen (1980), em que: $Cv < 12\%$ indica baixa variabilidade, $Cv 12\% < Cv < 60\%$ indica média variabilidade e $Cv > 60\%$, indica alta variabilidade; observa-se que a precipitação apresentou alta variabilidade $Cv > 60\%$.

Tabela 1-Estatística descritiva da precipitação mensal (mm) nas bacias PCJ no período de 1980 a 2019.

N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	S	Cs	Ck	Cv (%)
480	122,25	107,45	0,14	452,11	92,37	0,78	0,26	75,56

n: número de observações, S: desvio padrão; Cs: coeficiente de assimetria; Ck: coeficiente de curtose; Cv: coeficiente de variação.

O tipo de modelo teórico que melhor se ajustou aos dados foi o esférico (Figura 3B), apresentando um R^2 de 0,96, um SQR de 0,14 e um coeficiente de regressão da validade cruzada (rvc) igual à 0,98 (Tabela 2). Considerando os limites propostos por Zimback (2001), o valor de 0,82 obtido para o IDE (Tabela 2), indica que a precipitação nas bacias PCJ apresenta uma alta dependência temporal, sendo essa dependência equivalente a aproximadamente sete meses (Figura 3A).

Tabela 2- Modelo teórico, valores dos componentes do variograma e parâmetros estimados.

Modelo	Ao	Co	Co + C	R^2	SQR	Rvc	IDE
Esférico	6,98	1690,00	9209,00	0,96	0,14	0,98	0,82

Ao: Alcance em meses; Co: efeito pepita; $Co + C$: patamar; R^2 : coeficiente de determinação; SQR: soma dos quadrados dos resíduos; rvc: coeficiente de regressão da validação cruzada; IDE: índice de dependência espacial.

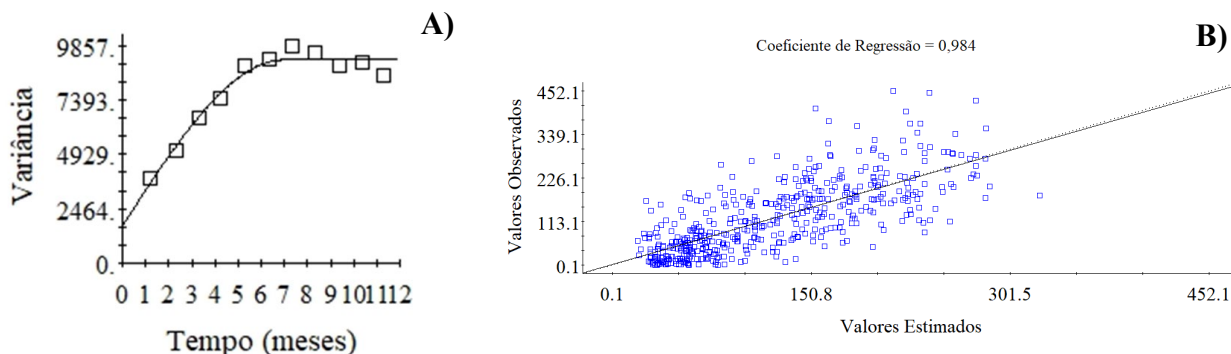


Figura 3- A) Variograma da precipitação nas bacias PCJ no intervalo de separação (*lag*) de 12 meses; B) Gráfico da validação cruzada gerado pelo programa GS+®.

A visualização da variabilidade temporal da precipitação mensal ao longo dos anos da série histórica (1980 a 2019) nas bacias PCJ é apresentada na Figura 4, na qual pode ser analisado o mapa 2D resultante do processo de krigagem ordinária. Observa-se que nas bacias PCJ o período chuvoso, com precipitação mensal média variando de $>83\text{mm}$ à $>285\text{mm}$, compreende os meses de outubro a abril (7 meses), enquanto o período seco, com precipitação variando de 15 a 83mm , compreende os meses de maio a setembro (6 meses). Ressalta-se que no processo de krigagem ordinária, os valores mínimos e máximo são desconsiderados a fim de promover uma minimização dos erros, deixando-se para a análise apenas os valores que estão em torno da média, dessa forma, no processo de interpolação, os valores mais baixos de precipitação são superestimados e os valores mais altos subestimados. Observando-se atentamente o mapa, é possível perceber, por exemplo, que precipitações acima de 83mm no mês de maio (mês 5), considerado um mês seco por apresentar usualmente precipitações na faixa de 15 a 83mm , ocorreram em diferentes anos da série histórica: 1984, 1986, 2004 e 2013, podendo esses anos serem considerados como anos atípicos. Destaca-se também, o fato de que o mês de outubro (mês 10), considerado como chuvoso por apresentar normalmente precipitação $>83\text{mm}$, ter apresentando valores menores de 83mm nos anos de 1985, 1986, 1999 e 2014, esse anos também podem ser classificados como atípicos.

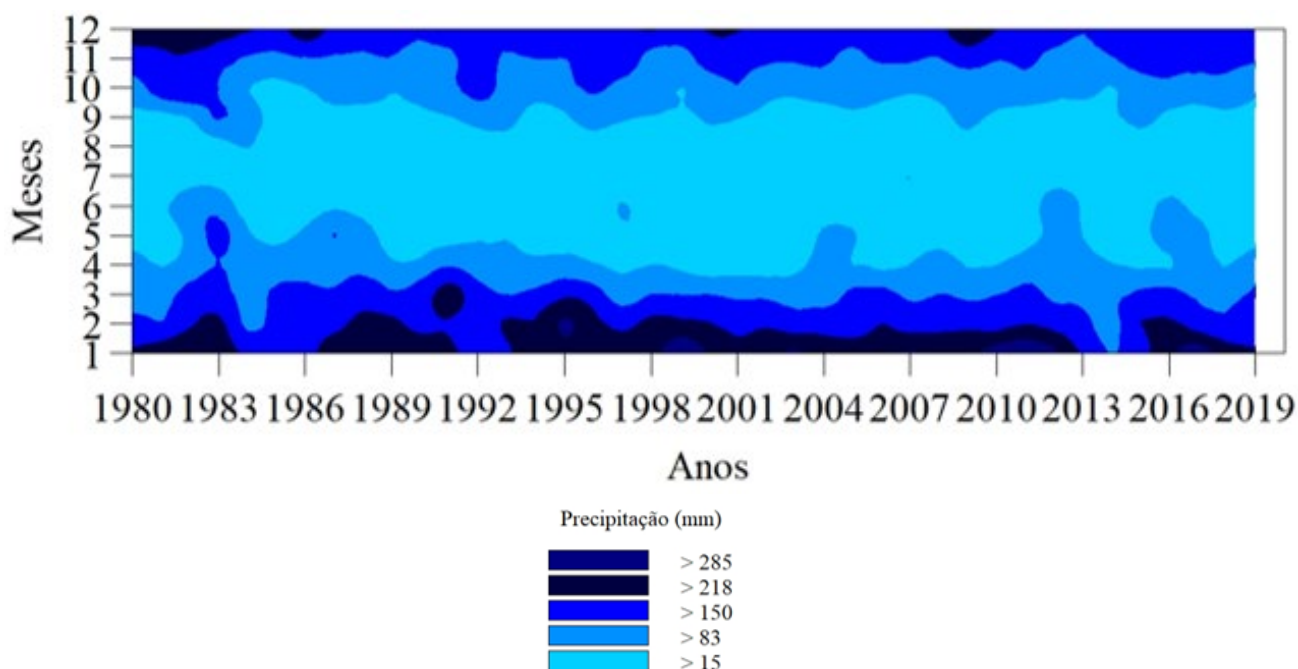


Figura 4- Mapa da distribuição e variabilidade temporal da precipitação mensal nas bacias PCJ no período de 1980 a 2019.



CONCLUSÕES

Nas bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá a precipitação apresenta dependência temporal de aproximadamente sete meses, considerada alta. A variabilidade temporal da precipitação observada no produto gerado pelo método geoestatístico de krigagem ordinária (mapa) permite inferir que ao longo do ano, nas bacias PCJ, a precipitação apresenta o seguinte padrão: um período seco, que se inicia no mês de maio e se estende até o mês de setembro, e um período chuvoso, que se inicia no mês de outubro e se estende até o mês de abril. Portanto, no planejamento do uso dos recursos hídricos, devem ser adotadas estratégias, destaca-se aqui o reúso, para o enfrentamento desse longo período com baixas precipitações mensais (inferiores a 83 mm) a fim de garantir a segurança hídrica para os múltiplos usuários, evitando-se, conseqüentemente, situações de conflito pelo uso da água.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de doutorado à primeira autora por meio do projeto 143899/2019-8.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ (2018). *Primeira revisão do Plano das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá 2010 a 2020*. Piracicaba: Agência das Bacias PCJ, 2018. Execução Técnica: Profill engenharia e ambiente e RHAMA consultoria pesquisa e treinamento. Disponível em: <<https://plano.agencia.baciaspcj.org.br/documentos/etapa-1-plano-vigente>>. Acesso em: 01 fev. 2022.

BRUBACHER, J. P.; OLIVEIRA, G. G.; GUASSELLI, L. A. (2020). *Preenchimento de Falhas em Séries Temporais de Precipitação Diária no Rio Grande do Sul*. Revista Brasileira de Meteorologia, São José dos Campos, v. 35, n. 2, p. 335-344, jun. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786352035>.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DAEE) (2020). *Hidrologia: banco de dados hidrológicos*. Banco de Dados Hidrológicos. Autarquia do governo do estado de São Paulo. Disponível em: <http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br/>. Acesso em: 01 dez. 2020.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DE ÁGUAS (IGAM) (2020). *Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos dos Rios Piracicaba e Jaguari - PJ1*. 2016. Disponível em: http://comites.igam.mg.gov.br/images/mapas/Mapas_PDF/Localizao_PJ1_A3.pdf. Acesso em: 01 fev. 2022.

SISTEMA INTEGRADO DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE SÃO PAULO (SIGRH) (2020). *UGRHI 05 Piracicaba/Capivari/Jundiá*. Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/6962/ugrhi_05.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2022.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. (1980). *Spatial variability of soil physical properties in the field*. Ed. Por HILLEL, D. Applications of soil physics. New York, Academic Press, 1980. 350p.

ZIMBACK, C.R.L. (2001). *Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo*. Tese (Livre-Docência em Levantamento do solo e pedologia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.