

ANÁLISE ESPACIAL DO CONTEÚDO DE ÁGUA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARDO¹

LUÍS GUSTAVO FREDIANI LESSA²; ALESSANDRA FAGIOLI DA SILVA³; CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK⁴ E RONALTON EVANDRO MACHADO⁵

¹ Parte da Tese do primeiro autor;

² Geólogo, Prof. Doutor do Departamento de Recursos Naturais/Ciências Ambientais, FCA / UNESP, C.P. 237, CEP 18610-307, Botucatu, SP, luisgustavo_lessa@yahoo.com.br;

³ Engenheira Agrônoma, Doutoranda em Agronomia (Energia na Agricultura), FCA / UNESP, Rua Humberto Milanesi, 159, Residencial Primavera, 18.610-385, Botucatu, SP, alefagioli@hotmail.com;

⁴ Engenheira Agrônoma, Profa. Dra. do Departamento de Recursos Naturais/Ciência do Solo, FCA / UNESP, C.P. 237, CEP 18610-307, Botucatu, SP, czimback@fca.unesp.br;

⁵ Eng. Agrícola, Prof. Doutor, Departamento de Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de Piracicaba – EEP/FUMEP, CEP: 13414-040, Piracicaba/SP, remachad@yahoo.com.br.

1 RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo avaliar a distribuição espacial, por geoestatística, da produção de água gerada pelo modelo hidrológico matemático SWAT 2009 (*Soil and Water Assessment Tool*, versão 2009), da parte inicial da bacia hidrográfica do Rio Pardo – SP. Foi utilizado um Sistema de Informação Geográfica (SIG) associado a uma interface com o modelo SWAT para a confecção do banco de dados. Para isto, as informações de entrada necessárias para avaliar a produção de lâmina de água (mm), que infiltrou e armazenou em cada sub-bacia gerada pelo SWAT, referem-se a dados tabulares climáticos e de parâmetros físicos e químicos de solo e a planos de informações como: o Modelo Numérico do Terreno (MNT), Mapa de Uso do Solo e Mapa de Solos. A amostragem geoestatística foi representada por uma malha irregular georreferenciada com 43 pontos localizados na parte central de cada sub-bacia representando a quantidade de água produzida. A análise geoestatística foi realizada pela construção dos variogramas e posteriormente a confecção dos mapas interpolados por krigagem. Do resultado obtido observou-se que a produção de água apresentou dependência espacial e que esta ocorreu de forma homogênea, tanto para os maiores como para os menores valores de produção de água encontrados na bacia.

Palavras-chave: geoestatística, krigagem, SWAT

LESSA, L. G. F.; SILVA, A. F. da; ZIMBACK, C. R. L.; MACHADO, R. E.
SPATIAL ANALYSIS OF WATER CONTENT OF THE PARDO RIVER BASIN

2 ABSTRACT

The present study aims to evaluate the spatial distribution, for geostatistics, of water generated by mathematical hydrologic model SWAT 2009 (*Soil and Water Assessment Tool*, version 2009), on the initial part of Rio Pardo – SP basin. It was used a Geographic Information System (GIS) associated with an interface with the SWAT model for the database construction. The input information necessary to evaluate the production of water depth (mm), which has infiltrated and stored in each sub-basin generated by SWAT refers to

climatic and tabular data on physical and chemical parameters of soil and information plans such as: the Digital Elevation Model (DEM), Land Use and Soil Map. The geostatistical sampling was represented by an irregular grid with 43 georeferenced points located in the central part of each sub-basin indicating the amount of water produced. The geostatistical analysis was performed by the construction of variograms and then interpolated maps were obtained using kriging method. The result showed that the production of water presented spatial dependence and this occur by homogeneous form, both, for larger and smaller values, for the production of water found in the basin.

Keywords: geostatistics, kriging, SWAT

3 INTRODUÇÃO

A água é de fundamental importância para a preservação dos ciclos naturais e da biodiversidade do planeta, para as produções agrícola e industrial dos países e, para a geração de energia consumida pela humanidade (Lessa, 2011).

Para a determinação de uma área de estudo utiliza bacia hidrográfica como unidade de trabalho, pois, constitui um sistema natural bem delimitado no espaço, composto por um conjunto de terras topograficamente drenadas por um curso d'água e seus afluentes, constituindo-se em uma unidade espacial de fácil reconhecimento e caracterização, pois é um limite nítido para ordenação territorial (Santos, 2004).

Com o intuito de analisar e representar o comportamento ambiental das bacias hidrográficas, no que se refere ao escoamento superficial e subterrâneo, surgem os modelos hidrológicos matemáticos como alternativa, os quais também são utilizados para prever cenários diferentes dos que são observados (Tucci, 1998; 2001).

Com o desenvolvimento de técnicas de computação surgiram diversos modelos hidrológicos que prevêem o impacto de práticas de manejo do solo em relação à produção de água e sedimentos integrados aos Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) por interfaces apropriadas, que permitem gerenciar o banco de dados de inúmeras variáveis ambientais no suporte à tomada de decisões.

Entre esses modelos que simulam a produção de água e sedimentos tem-se o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) desenvolvido na *Agricultural Research Service* (ARS – órgão ligado a USDA – *United States Department of Agriculture*), uma ferramenta de domínio público (Neitsch et al., 2002).

O modelo SWAT requer como dados de entrada informações sobre as características físicas da bacia, como condições meteorológicas, propriedades físicas e químicas do solo, topografia e práticas de manejo realizadas. Como parâmetros de saída, a estrutura de dados é dividida em oito componentes principais: clima, ciclo hidrológico, nutrientes e pesticidas, erosão, cobertura do solo e crescimento vegetal, práticas de manejo, propagação no canal principal e, corpos de água (Neitsch et al., 2002).

Shaw (2001) relatou que ao se manusear os dados de entrada, esta operação permite ao usuário modelar as bacias hidrográficas e quantificar o impacto das mudanças na qualidade da água, pela simulação dos vários processos físicos diferentes em uma mesma bacia hidrográfica. O modelo foi desenvolvido para prever o efeito dos diferentes cenários de manejo na qualidade da água, produção de sedimentos e cargas de poluentes em bacias hidrográficas agrícolas (Srinivasan; Arnold, 1994).

Como o SWAT gera relatórios descritivos pontuais das variáveis, e entre elas a produção de água, o resultado é melhor visualizado pela espacialização dos dados, realizado por meio da análise geoestatística.

A geoestatística trata de problemas referentes às variáveis regionalizadas, as quais têm um comportamento espacial mostrando características intermediárias entre as variáveis verdadeiramente aleatórias e aquelas totalmente determinísticas. Caso as variáveis de estudo apresentem dependência espacial é necessário que esta seja avaliada utilizando-se do variograma (Silva, 1988; Landim, 2003).

A determinação do variograma é o início do procedimento de estimativa geoestatística. É o passo mais importante, porque o modelo escolhido será utilizado através de todo o processo de interpolação e influenciará todos os resultados e conclusões. Nesse estágio, o analista deverá decidir se pode ou não aplicar a geoestatística para inferências, pois o variograma é a única maneira para verificar se a variável em estudo tem continuidade espacial ou não (Silva et al., 2011).

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a distribuição espacial, por geoestatística, da produção de água gerada por modelagem pelo SWAT 2009, na parte inicial da bacia hidrográfica do Rio Pardo – SP.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo está geograficamente localizada entre as coordenadas 23°06'14" e 22°56'07" de latitude sul e, 48°28'37" e 48°20'40" de longitude WGr, com altitudes variando entre 840 a 1.007 metros (IBGE,1969; IBGE,1982). Compreende a parte inicial da bacia hidrográfica do Rio Pardo, que abrange áreas dos municípios de Pardinho – SP (local onde se encontra a nascente) e Botucatu (até o local de captação de água pela SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo), de importância por ser o manancial de captação de água para esses municípios, que se situam na região centro sul do Estado de São Paulo.

As informações sobre o uso do solo foram obtidas das imagens do satélite CBERS II B (*Chine-Brasil Earth Resources Satellite II B*) geradas em 07 de dezembro de 2008. As imagens orbitais foram obtidas de dois tipos de sensores: **CCD** (*High Resolution CCD Camera*, ou Câmera Imageadora de Alta Resolução), bandas 2, 3 e 4, correspondentes ao azul, verde e vermelho; e **HRC** (*High Resolution Camera*, ou Câmera Pancromática de Alta Resolução).

Na área, segundo Zimback (1997) foram encontrados cinco tipos representativos de solos: Latossolo Vermelho Distrófico, Latossolo Vermelho Distroférrico, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, Gleissolo Háptico Distrófico e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico.

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região pertence a classe Cwa, sendo um clima mesotérmico, com estação mais seca no inverno, com temperaturas médias anuais em torno de 20°C e índice pluviométrico entre 1.100 e 1.700 mm anuais (Carvalho; Jim, 1983).

Os PIs (Planos de Informações) foram importados pelo SWAT 2009 por meio de interface apropriada, que processou os dados inseridos no banco de dados do modelo hidrológico e utilizou-se do SIG ArcView®, versão 9.3, compatível com esta interface, para gerar as informações processadas no modelo, na forma de mapas, gráficos, tabelas e relatórios.

Os dados de entrada necessários para o processamento no SWAT 2009 foram os PIs: Modelo Numérico do Terreno (MNT), Mapa de Uso do Solo e Mapa de Solos; e informações dos dados alfanuméricos dos parâmetros físicos e químicos do solo e dados climáticos.

Os dados de solo foram digitados diretamente no banco de dados do modelo e os parâmetros foram: número de camadas do solo, grupo hidrológico, profundidade das camadas, máxima profundidade da raiz no perfil do solo, densidade do solo, fração de porosidade, capacidade de água disponível, condutividade hidráulica saturada, fator erodibilidade do solo, porcentagem de partículas (areia, silte, argila e fragmentos de rochas), albedo e carbono orgânico.

Com relação aos dados climáticos que foram inseridos no banco de dados do modelo SWAT são necessários parâmetros diários de: temperatura mínima do ar, temperatura máxima do ar, precipitação, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa. Estes dados foram coletados no período de 01 de janeiro de 1994 a 31 de dezembro de 1999, por equipamentos instalados na Faculdade de Ciências Agrônômicas / UNESP / Campus de Botucatu.

Tanto os Planos de Informações como os dados alfanuméricos são inseridos no modelo por uma interface entre o SWAT e o SIG ArcView®. A interface automaticamente subdivide a bacia em sub-bacias a partir do MNT, extraíndo os dados de entrada a partir dos (PIs) e do banco de dados relacionados para cada sub-bacia (Di Luzio et al., 2002).

O resultado final das informações processadas pelo SWAT foi um relatório contendo informações de variáveis que foram calculadas para o período proposto de estudo, de 1994 até 1999, dentre elas, a quantificação da produção de água anual (mm) para cada sub-bacia.

Como o SWAT subdivide automaticamente a bacia hidrográfica em sub-bacias foi necessário criar um novo plano de informação (PI) que melhor representasse geostatisticamente a produção de água para cada sub-bacia.

Para isso, os valores de produção de água passaram a ser representados na parte central de cada sub-bacia e não mais no ponto de descarga, ou seja, na foz de cada sub-bacia. Este procedimento foi adotado com o intuito de se obter maior representação dos valores de produção de água ao longo da área de cada sub-bacia.

A amostragem foi representada por uma malha irregular georreferenciada, obtida por intermédio da confecção deste novo PI, com 43 pontos localizados na parte central de cada sub-bacia representando a quantidade de água produzida (Figura 1).

Utilizou-se o software GS⁺ 9.0 (Robertson, 2008) para realizar a análise geoestatística e verificar a dependência espacial dos dados, por intermédio de variogramas. Os variogramas para cada ano foram ajustados e assim, obtidos os valores de efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C$) e alcance (a), de acordo com o maior valor do coeficiente de regressão (CR) obtido pelo cálculo da validação cruzada, conforme encontrado em Isaaks e Srivastava (1989).

Na sequência foi executada a interpolação por krigagem ordinária, que é um estimador que se baseia numa série de técnicas de análise de regressão e que procura minimizar a variância estimada a partir de um modelo prévio que leva em conta a dependência estocástica entre os dados distribuídos no espaço (Landim, 2003).

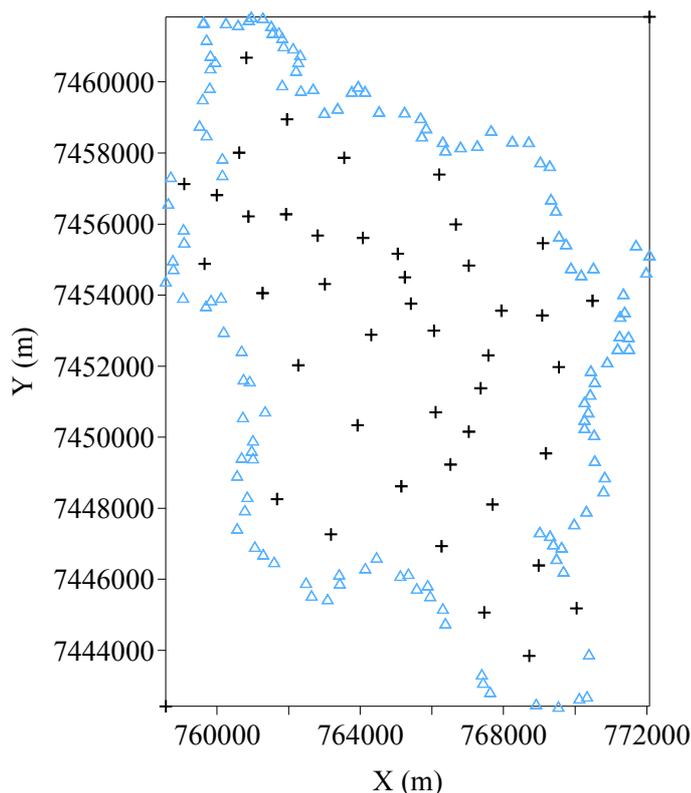


Figura 1. Malha amostral das 43 sub-bacias definidas pelo SWAT na parte inicial da bacia do Rio Pardo.

5 RESULTADO E DISCUSSÃO

O conteúdo de água da parte inicial da bacia do Rio Pardo do ano de 1994 a 1999 apresentou estrutura espacial ajustando-se ao modelo esférico (Tabela 1 e Figura 2).

Tabela 1. Modelo e parâmetros dos variogramas do conteúdo de água (mm) anual da parte inicial da bacia do Rio Pardo

Atributo	Modelo	Alcance	C_0	C_0+C	IDE	CR
1994	Esférico	3.210,00	1,00	2.931,00	100	0,90
1995	Esférico	3.270,00	10,00	9.300,00	99	0,86
1996	Esférico	3.010,00	10,00	3.423,00	99	0,97
1997	Esférico	2.960,00	10,00	5.141,00	99	0,93
1998	Esférico	2.990,00	1,00	2.890,00	100	0,97
1999	Esférico	2.820,00	6,00	1.627,00	99	0,89

Alcance (m); C_0 : efeito pepita; C_0+C : patamar; IDE: índice de dependência espacial (%); CR: coeficiente de correlação da validação cruzada.

Em todos os anos o conteúdo de água (mm) da bacia hidrográfica apresentou alta dependência espacial ($IDE \geq 75\%$), conforme Zimback (2001).

O conteúdo de água (mm) do ano de 1999 apresentou o menor alcance (2.820,00 m) e o ano de 1995 o maior alcance (3.270,00 m), porém no geral todos os anos tiveram valores de

alcance parecidos, com isso, os mapas interpolados por krigagem apresentaram comportamento semelhante (Figura 3).

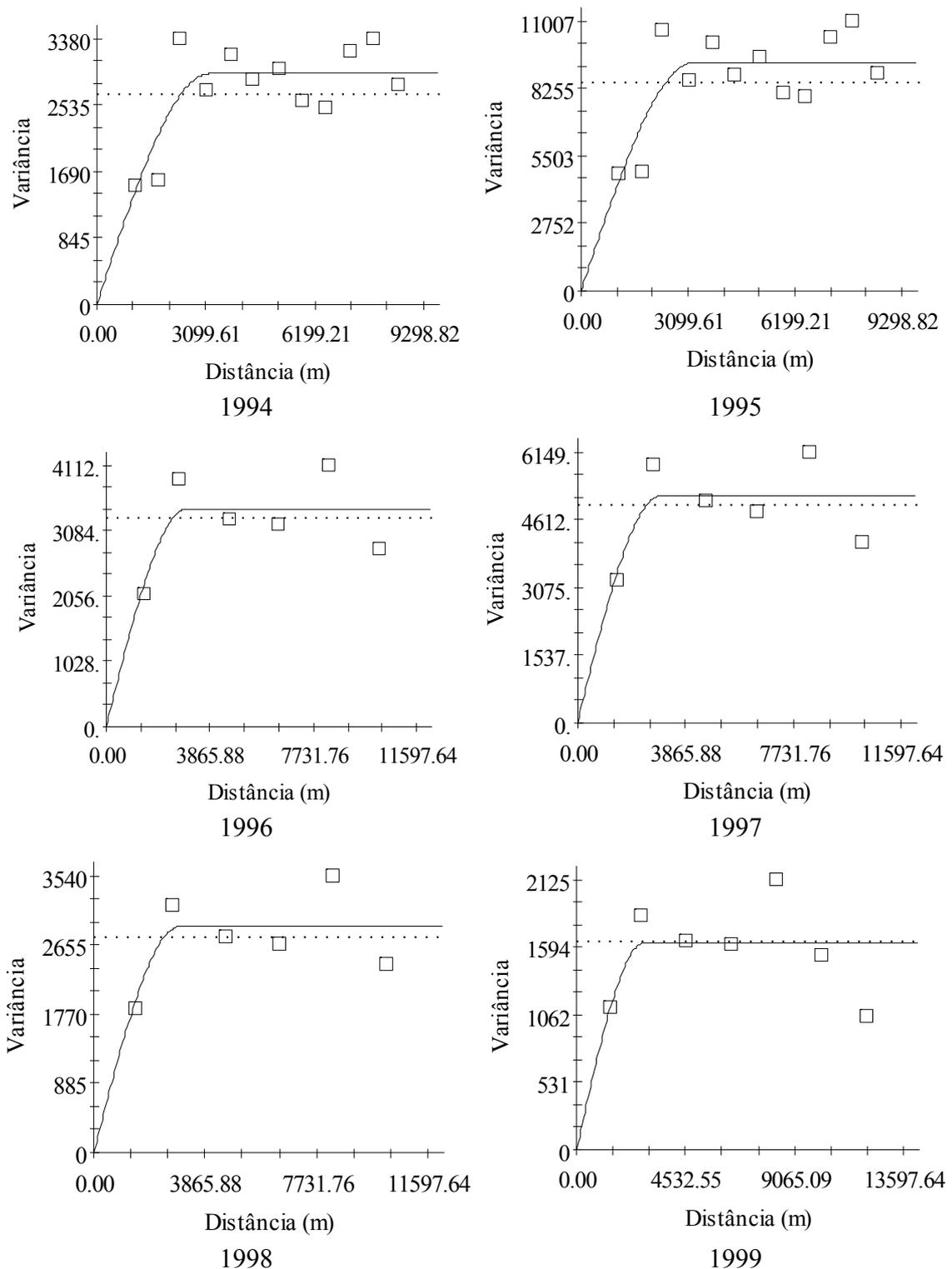


Figura 2. Variogramas do conteúdo de água (mm) anual, da parte inicial da bacia do Rio Pardo, durante os anos de 1994 a 1999.

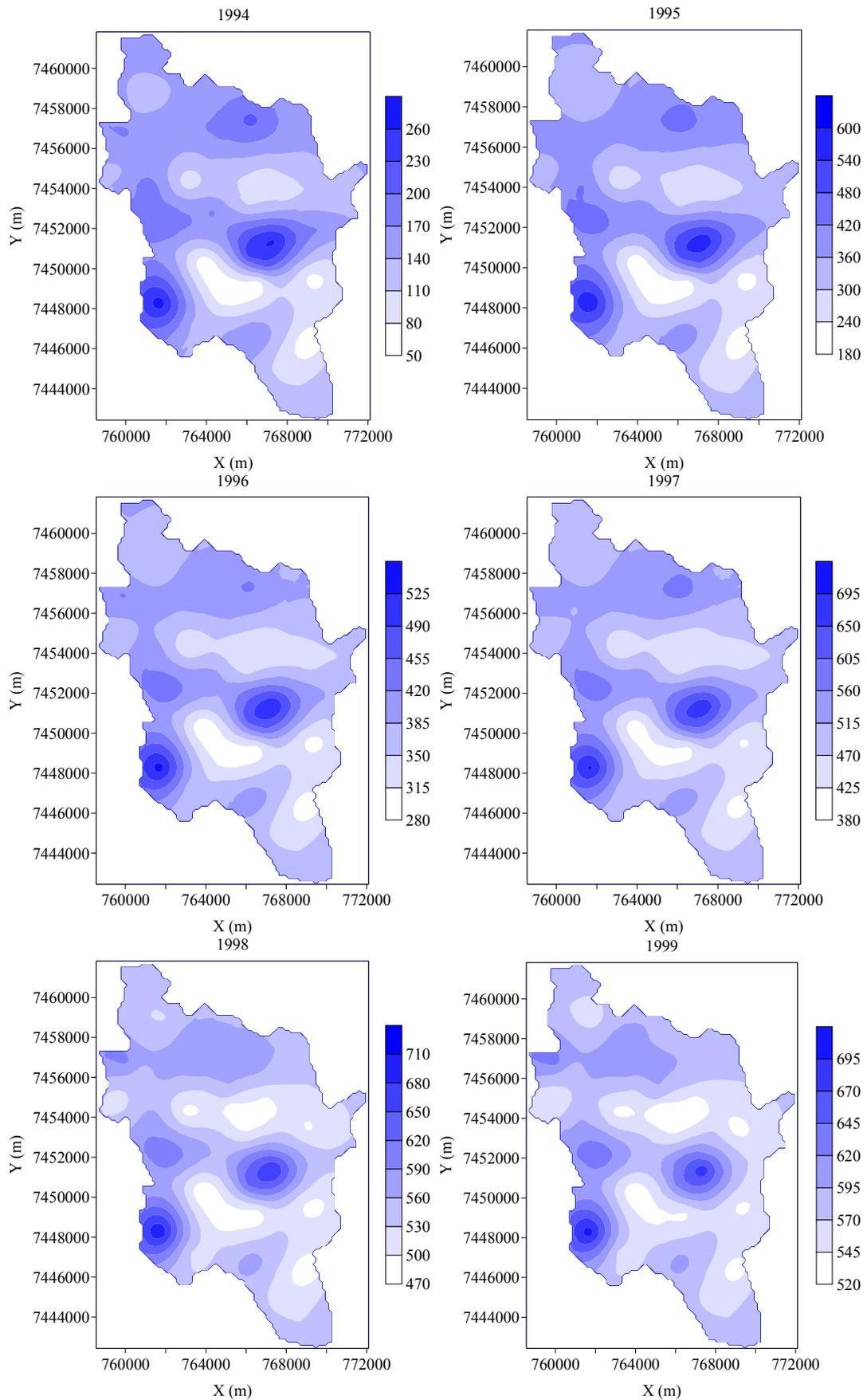


Figura 3. Mapas do conteúdo de água (mm) da parte inicial da bacia do Rio Pardo.

A Figura 3 apresenta a variação da produção de água (mm) nas sub-bacias de um ano para o outro. Como as informações de Modelo Numérico do Terreno (MNT), Mapa de Uso do Solo, e parâmetros físicos e químicos do solo são os mesmos para todos os anos, esta variação é devido aos dados climáticos (temperatura mínima do ar, temperatura máxima do ar, precipitação, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa).

O ano de 1994 foi o que apresentou menor conteúdo de água (mm) e o ano de 1998 o maior, porém ambos os anos apresentaram a mesma variação entre o valor mínimo e máximo do conteúdo de água (mm) produzido.

Este fato pode ser explicado do relatório gerado pelo SWAT, no qual foi observado que as variáveis, precipitação e evapotranspiração estão influenciando na oferta da produção de água nestas sub-bacias, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Valores anuais das variáveis climáticas geradas pelo SWAT durante o período de estudo

Variáveis	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Precipitação (mm)	1204,90	1767,60	1468,50	1682,50	1491,00	1281,20
Evapotranspiração (mm)	489,31	367,71	419,55	368,30	345,20	262,65

Observa-se que na bacia, para o ano de 1994 ocorreu menor precipitação e maior evapotranspiração o que resultou na baixa produção de água e que no ano de 1998 ocorreu maior produção de água, pois, sofreu menor influência do fenômeno de evapotranspiração dentre os anos mais chuvosos no período de estudo.

Analisando ainda a Figura 3, nota-se que no ano de 1995 ocorreu a maior variação entre os valores mínimo e máximo de conteúdo de água (60 mm), enquanto que no ano de 1999 a menor variação (25 mm).

Da correlação espacial observou-se uma distribuição homogênea para a produção de água entre as sub-bacias, sendo que os maiores valores ocorreram no grupo representado pelas sub-bacias 23, 24, 25 30 e no grupo das sub-bacias 29, 32, 36 e 37 (Figura 4) todas sobre Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAD), exceção para o primeiro grupo que apresenta predominância de Latossolo Vermelho Distrófico (LVRD) seguidos por Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAD). Todas as sub-bacias apresentam predominância de culturas de cana-de-açúcar.

Os menores valores de produção de água foram representados pelo grupo de sub-bacias 19, 28 e 35 e pelo grupo das sub-bacias 31, 33, 34, 38 e 39 todas sobre Latossolo Vermelho Distrófico (LVRD), exceção para as sub-bacias 38 na qual predomina Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAD) seguidos por Latossolo Vermelho Distrófico (LVRD) e nas sub-bacias 19 e 35 com ocorrência de manchas de Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAD). Todas as sub-bacias apresentam predominância de culturas de cana-de-açúcar.

As demais classes de solo apresentada na Figura 4 referem-se à Gleissolo Háptico Distrófico (GXBD); Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAD) e Latossolo Vermelho Distroférrico (LVDF), as quais não participam da discussão.

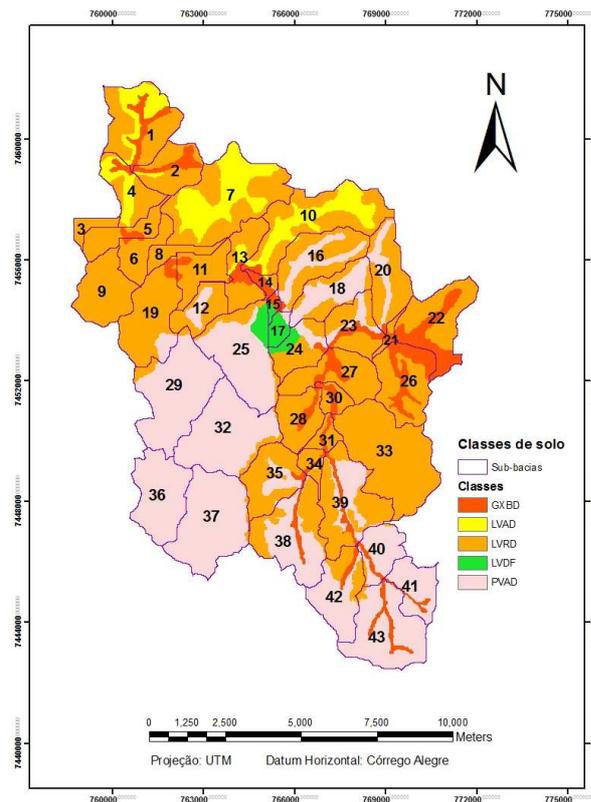


Figura 4. Mapa de Solos e sub-bacias da parte inicial da bacia do Rio Pardo.

6 CONCLUSÕES

Pelo estudo da distribuição espacial da produção de água gerada pelo SWAT observou-se que em todos os anos, o conteúdo de água produzido na parte inicial da bacia do Rio Pardo apresentaram dependência espacial, ajustando-se ao modelo esférico e com valores de alcance próximos. E verificou-se uma distribuição espacial homogênea quanto à produção de água, tanto em relação aos maiores quanto aos menores valores produzidos, durante o período analisado.

A análise espacial possibilitou uma visão holística da bacia discriminando locais de maior e menor produção de água.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARVALHO, W. A.; JIM, J. **Áreas de proteção ambiental**: região da “Serra de Botucatu” e região da “Serra de Fartura”. Botucatu: Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas; Instituto Básico de Biologia, 1983. 47 p.

DI LUZIO, M. et al. **Arcview Interface for Swat2000**: user’s guide. Temple: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 2002. 345 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Secretaria de Planejamento da Presidência da República. **Carta do Brasil – Quadrícula de Botucatu**. Rio de Janeiro, 1969. 1 folha SF – 22 – R – IV – 3 – Botucatu. Escala 1:50.000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Secretaria de Planejamento da Presidência da República. **Carta do Brasil – Quadrícula de Bofete**. Rio de Janeiro, 1982. 1 folha SF – 22 – Z – D – III – 1 – Bofete. Escala 1:50.000.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. 2.ed. São Paulo. UNESP, 2003. 253 p.

LESSA, L. G. F. **Simulação da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Pardo - Botucatu / SP, por modelagem hidrológica**. 2011. 141 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2011.

NEITSCH, S. L. et al. **Soil and water assessment tool: theoretical documentation version 2000**. Temple: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 2002. 498 p.

ROBERTSON, G. P. **GS⁺: Geostatistics for the environmental sciences – GS⁺ User's Guide version 9.0**. Plainwell: Gamma Desing Software, 2008. 152 p.

SANTOS, R. F. **Planejamento ambiental: teoria e prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004. 184 p.

SHAW, K. **An evaluation of the Basins 3.0 models including the procedural steps taken to evaluate the Barton Creek Watershed**. Lexington: University of Kentuck, 2001. 22 p.

SILVA, A. F. et al. **Aplicação da geoestatística em ciências agrárias**. Botucatu: FEPAF, 2011. 136 p.

SILVA, A. P. **Variabilidade espacial de atributos físicos do solo**. 1988. 105 f. Tese (Doutorado)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1988.

SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G. Integration of a basin-scale water quality model with GIS. **Water Resources Bulletin**, Hemdon, v. 30, n. 3, p. 453-462, 1994.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Editora da UFRGS; ABRH, 1998. 669 p.

TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS; ABRH, 2001. 943 p. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, 4).

ZIMBACK, C. R. L. **Levantamento semidetalhado dos solos da bacia do Rio Pardo nos municípios de Pardinho e Botucatu**. Botucatu: UNESP, Faculdade de Ciências Agronômicas, 1997. 55 p.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. 2001. 114 f. Tese de Livre-Docência (Livre-Docência em Levantamento do solo e fotopedologia)-Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.