

MODELAGEM ESPACIAL DE ÁREAS DE RECARGA SUBTERRÂNEA EM REGIÃO DE AFLORAMENTO DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI (SAG), EM BROTAS/SP.

Autor: Claudiane Otilia Paes

Orientador: Rodrigo Lilla Manzione

Resumo da dissertação apresentada à Unesp/FCA Botucatu

RESUMO

Em áreas de recarga de aquíferos, a infiltração da água no solo em profundidade é fundamental para que as relações oferta/demanda das águas subterrâneas sejam equilibradas. Os diferentes métodos de manejar o solo em função de sua ocupação vão exercer pressão sobre esse recurso hídricos e gerar respostas distintas na sua capacidade de recarga. Modelar a variabilidade espacial de atributos físicos e hídricos do solo é uma questão chave para o sucesso de sistemas de gestão do uso da água e do solo que possibilitem a recarga das águas subterrâneas. Através de um modelo de predição espacial e de métodos de interpolação é possível acessar essa informação, passando de pontos de amostragem que reúnam diversas variáveis que expliquem a variação dos níveis freáticos, para mapas sobre áreas mais favoráveis ou desfavoráveis à recarga. Assim, o objetivo deste trabalho foi modelar o comportamento de diferentes variáveis físico-hídricas do solo em função dos níveis de resposta do Sistema Aquífero Guarani (SAG) na bacia do Ribeirão da Onça em Brotas/SP. Através de um levantamento de variáveis como textura, granulometria, condutividade hidráulica e resistência à penetração, associadas a uma coleção de séries temporais de níveis freáticos e imagens de satélite classificadas da bacia; e usando métodos de regressão, interpolação e lógica fuzzy, criou-se um modelo de predição capaz de

estimar áreas que representem os locais com maiores e menores níveis de oscilação do aquífero. A partir da descrição desses fenômenos pretende-se que este modelo de predição auxilie na tomada de decisão no plano de gestão da microbacia e no uso sustentável e proteção dos recursos hídricos subterrâneos em áreas vulneráveis como os afloramentos do SAG.

Palavras-chave: regressão múltipla, análise espacial, hidrogeologia.

**SPATIAL MODELLING OF GROUNDWATER RECHARGE AREAS IN A
GUARANI AQUIFER SYSTEM (SAG) OUTCROP REGION IN BROTA/SP-
BRAZIL**

SUMMARY

In areas of groundwater recharge water infiltration into the soil at depth is critical to that demand does not exceed supply of water. Different methods of handling the soil due to its occupation will put pressure on this resource, and generate different responses in their ability to recharge. Modeling the spatial variability of physical, and hydraulic properties of the soil is a key issue for the success of management systems of land use that allow recharging of groundwater. Through interpolation methods you can access this information, and map more favorable or unfavorable to the recharge areas within a spatial prediction model that many different variables that explain the variation in groundwater levels. Thus, the aim of this work was to model the different levels of response Guarani Aquifer System (SAG) as a function of land use and hydro-physical soil properties, at Ribeirão da Onça basin in Brotas / SP. Through a survey of variables such as texture, grain size, hydraulic conductivity, and penetration resistance, associated with a collection of temporal groundwater levels and classified satellite images of the basin and using regression methods series, we created a model capable of

predicting spatial to generate maps representing the areas with higher, and lower levels of interference in the rebound. From the description of these phenomena it is intended that this prediction model assists in decision making in the management plan of the watershed and sustainable, use and protection of groundwater resources in vulnerable areas such as outcrops SAG.

Keywords: multiple regression, spatial analysis, hydrogeology.

1 INTRODUÇÃO

A água é utilizada em praticamente toda atividade humana, como indústria, agropecuária e consumo, e, também, é fundamental nos processos naturais do ciclo hidrológico. Entretanto, apesar dessa grande importância, esse recurso há muito tempo não vem sendo utilizado com o devido planejamento. Com o aumento da população, e, por consequência das atividades humanas, a pressão sobre esse recurso, tem causado grande exaustão das suas reservas superficiais, culminando em uma iminente escassez hídrica.

Essa escassez hídrica faz com que, na atualidade, haja grande preocupação com as reservas de água potável, para que se possa garantir a manutenção da vida no planeta. Neste contexto, as reservas hídricas subterrâneas apresentam-se como alternativa viável de garantir o consumo hídrico, pois tratam-se de uma fonte de abastecimento segura e abundante. As reservas subterrâneas apresentam-se nos aquíferos, ou seja, compartimentos geológicos que armazenam e transmitem água. Esses compartimentos geológicos estão distribuídos em todo subsolo mundial. Na América do Sul, em relevância no Brasil, pode-se destacar a importância do Sistema Aquífero Guarani, um dos maiores mananciais subterrâneos do planeta.

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) constitui uma importante reserva hídrica, sendo necessárias estratégias de proteção em suas áreas de afloramento, a fim de

garantir a qualidade e disponibilidade da água. As áreas de afloramento são as mais vulneráveis em um sistema aquífero, pois, através delas é que, o aquífero faz a recarga do lençol freático e estabelece contato direto com a superfície, em um processo dinâmico do ciclo hidrológico. Neste processo as características do uso e manejo dos solos vão interferir nas características físico-hídricas dos solos e conseqüentemente na fluidez de movimento da água em profundidade para que ocorra a recarga. As áreas de recarga são fundamentais para garantir o reabastecimento dos aquíferos, entretanto, quando não manejadas corretamente podem ter os processos de infiltração de água no solo comprometidos, além de serem potenciais fontes de entrada de poluentes para águas subterrâneas.

Assim, o uso agrícola do solo acaba por exercer forte pressão sobre o processo dinâmico de recarga, a manutenção da qualidade e a quantidade da água disponível. Isso porque cada tipo de cultura tem determinada exigência hídrica e cada tipo de manejo empregado nessa cultura acaba por interferir nas propriedades do solo de maneira diferenciada, por vezes dificultando a infiltração da água. Devido à grande presença da agricultura em áreas de recarga do SAG, estudar as relações entre o uso e ocupação da terra e os recursos naturais é fundamental para a gestão sustentável desse manancial subterrâneo.

Conhecer as características físico-hídricas de um solo em uma determinada bacia hidrográfica requer métodos que sejam capazes de modelar a variabilidade espacial dos processos que envolvem o solo, que possibilitem uma real amostragem do problema e, de fato, possam contribuir para a gestão e planejamento dos usos dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais. O objetivo deste trabalho foi realizar a partir de um levantamento de variáveis físico-hídricas dos solos, em uma bacia hidrográfica em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG),

analisar as informações sob a ótica da análise espacial de dados geográficos, procurando entender como as propriedades do solo influenciam a oscilação dos níveis freáticos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2. 1 - Área de estudo

2. 1. 2 - Localização

A Bacia do Ribeirão da Onça está localizada no Município de Brotas (SP), centro-oeste do Estado de São Paulo, entre as latitudes 22°10' e 22°15', e entre as longitudes 47°55' e 48°00', correspondendo a uma área de aproximadamente 5.300 ha (Figura 1).

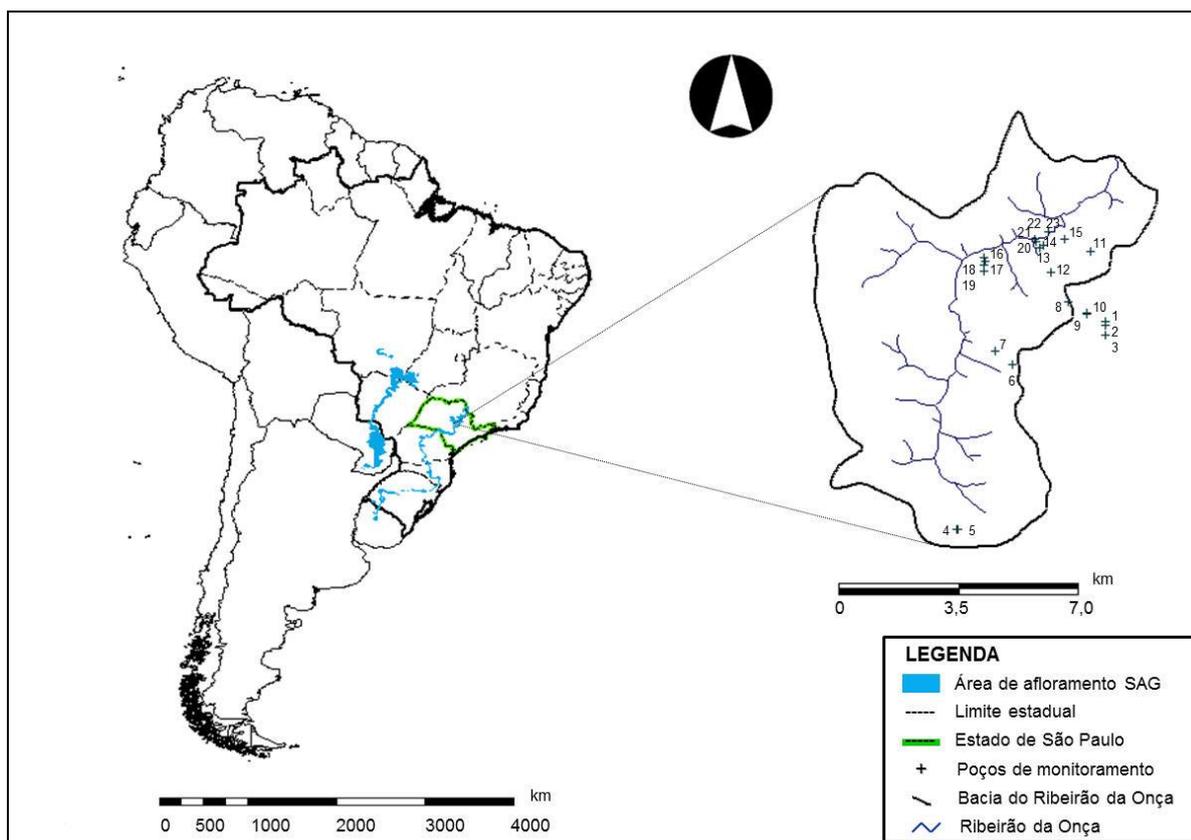


Figura 1. Mapa de localização da Bacia do Ribeirão da Onça.
Fonte: Manzione et al (2012)

2. 1. 2 –Caracterização da Bacia

A bacia do Ribeirão da Onça é uma das formadoras do Rio Jacaré Guaçu, sendo este, afluente do Rio Tietê. Quanto às características físicas, segundo Barreto (2006), geologicamente a Bacia desenvolve-se em sua grande parte sobre o arenito da Formação Botucatu, sendo que próximo ao seu exutório encontra-se o complexo Botucatu-Diabásio, ambas as partes do Grupo São Bento. Complementado por Gomes (2008), a jusante da bacia encontra-se sobre *sills* de diabásio, que fazem parte do grupo São Bento de idade Mesozoica, e encontra-se ainda a Formação Bauru que recobre a Formação Botucatu

Os solos da Bacia, como provêm do Arenito Botucatu, apresentam uma composição homogênea formada basicamente por neossolos quartzarênicos, com presença de argilas somente na região do exutório. Há ainda a presença dos solos, atualizados segundo a Embrapa (2013), como Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico; Latossolo Vermelho Eutroférico; Nitossolo Vermelho Distrófico ou Eutrófico; Gleissolos e Latossolos Vermelho Distróficos. Climatologicamente, a Bacia é classificada segundo a metodologia de Köppen, possui clima subtropical úmido com chuvas de verão (Cwa), variando para clima tropical úmido com inverno seco, a temperatura média anual é de 20,5°C. Economicamente, a bacia pode ser considerada de uso exclusivamente agrícola, sem áreas consideradas de pavimentação, ou de uso industrial. A Bacia do Ribeirão da Onça é uma típica bacia hidrográfica encontrada no interior do Estado de São Paulo, fortemente sujeita a utilização econômica, apresentando diversos cultivos como cana de açúcar, citros, eucalipto, pastagens, entre outras culturas (Figura 2). Conseqüentemente, a bacia está exposta a mecanismos potenciais de contaminação decorrente de atividades agrícolas (WENDLAND et al., 2007).

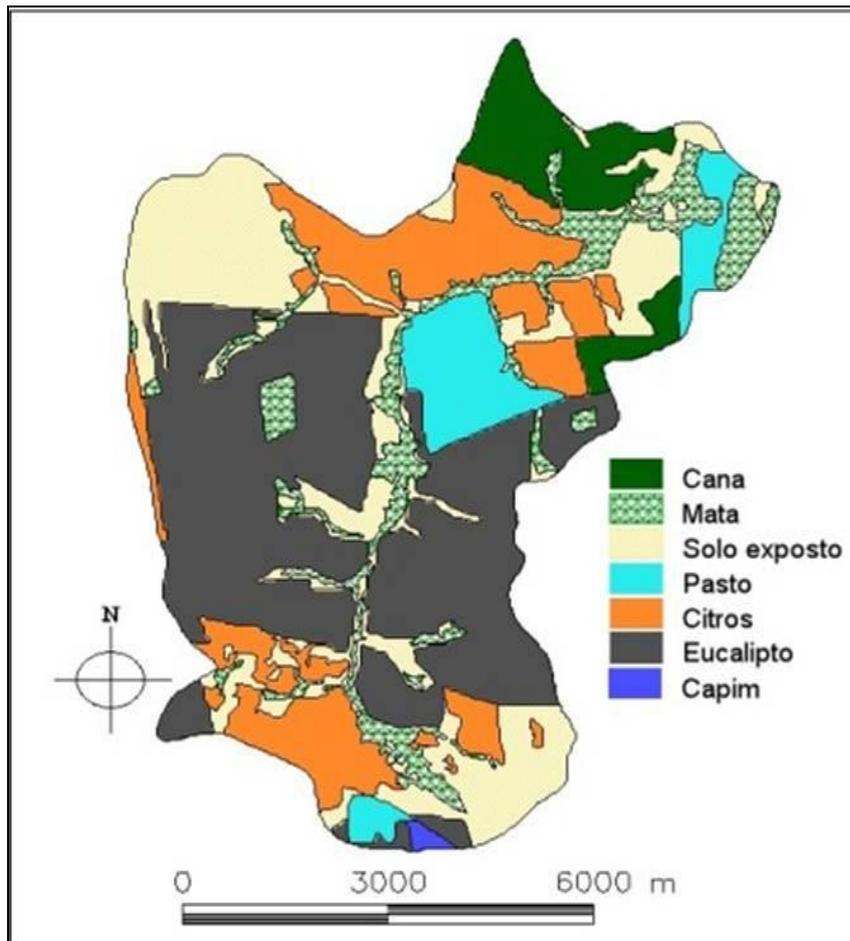


Figura 2. Mapa de ocupação do solo da Bacia do Ribeirão da Onça, ano de 2011.
 Fonte : Tanikawa e Manzione (2011).

Trata-se de uma área de afloramento e recarga do Sistema Aquífero Guarani (SAG), característica importante para fornecer dados, e elementos para aprofundamento de estudos, que visem o conhecimento do comportamento de suas áreas de afloramento e recarga.

2. 1. 3 – Monitoramento hidrogeológico

A bacia do Ribeirão da Onça, está situada em área considerada piloto para estudo, acerca da recarga do SAG, inúmeros trabalhos têm sido desenvolvidos em áreas semelhantes, a fim de, fornecer maiores subsídios ao planejamento de uso, e gestão do SAG. (GIAMPÁ e SOUZA, 1982; CONTIN NETO, 1987, CUNHA, 2003).

A área possui um total de, 23 poços de monitoramento de níveis freáticos, que quinzenalmente são monitorados. Esse monitoramento é realizado por alunos do Laboratório de Hidráulica e Saneamento, da USP de São Carlos. As informações a respeito da oscilação do nível freático são fruto do monitoramento quinzenal realizados por pesquisadores do CHREA/USP de São Carlos. Os poços de monitoramento, estão distribuídos nos diversos tipos de uso do solo presentes na bacia (cana-de-açúcar, citros, eucalipto e pastagens, além da vegetação nativa de Cerrado). As propriedades físicas do solo sobre textura e granulometria, foram analisadas segundo os métodos da Embrapa (1997). A permeabilidade foi obtida utilizando-se um permeâmetro de Guelph disponível no Campus da UNESP/Ourinhos. Os ensaios de permeabilidade realizados em pelo menos três pontos em cada tipo de uso do solo na bacia, afim de demonstrar a influência dos sistemas de cultivo e manejo no processo de infiltração (ELRICK et al., 1989; ELRICK e REYNOLDS, 1992).

A compactação do solo foi medida através da resistência do solo à penetração, com o uso de um penetrômetro automático, da marca Falker, modelo PenetroLOG 1020, que executa medições até 60 cm de profundidade. Os dados de Distância da drenagem foram obtidos a partir de uma medição em um SIG, e os dados de Coeficiente de cultura foram calculado segundo Allen et al. (1998).

2. 2 -Modelagem dos dados

2. 2. 1 - Análise geoestatística – variografia e krigagem.

A geoestatística trata-se de uma ferramenta de grande relevância, em estudo que envolve análise de solo, pois leva em consideração a grande variabilidade dos dados, e a dependência entre eles. Utilizando-se o semivariograma como estimador da dependência espacial entre as amostras e para determinar a dimensão da

correlação entre as amostras e sua similaridade ou não, com a distância. O semivariograma será a ferramenta utilizada na análise de dados espaciais para verificar sua variabilidade, dependência, continuidade e representação espacial, e pode ser estimado através da Equação 1:

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

Onde, $N(h)$ é o número de pares de valores medidos $Z(x_i)$, $Z(x_i+h)$, separados por um vetor h . O gráfico de $\gamma^*(h)$ versus os valores correspondentes de h é uma função do vetor h , e, portanto, dependem de ambos, magnitude e direção de h , ilustrando a relação entre a variância das amostras e suas distâncias laterais (ISAACS; SRIVASTAWA, 1989). Através da krigagem foi modelado variabilidade espacial, por meio, a partir de observações pontuais, informações extrapoladas para grandes áreas, baseadas nas observações da variável a ser estimada em locais não amostrados. A krigagem compactua com representações contínuas de propriedades e classes de solo, proporciona estimativas de pixéis (2D), e blocos (3D) de tamanhos variáveis e, ainda, estima incertezas. Em alguns casos permite também incorporação de componentes determinísticas na forma de tendências. A Equação 2, demonstra o calculo feito para, atribuir valores, em locais não amostrado. Supondo-se que se queiram estimar valores, z^* , para qualquer local, x_0 , onde não se tem valores medidos, o estimador será:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

Em que N é número de valores medidos, $z(x_i)$, envolvidos na estimativa; e λ_i são pesos associados a cada valor medido, $z(x_i)$. Segundo Isaacs e Srivastawa (1989), a krigagem é um estimador linear ponderado, que calcula o valor dos pesos

pela estimativa da estrutura espacial da distribuição das variáveis, representadas por um semivariograma experimental. É considerado um estimador linear não enviesado (best linear unbiased estimator, BLUE), em que a variância da krigagem é utilizada para definir intervalos de confiança do tipo gaussiano. No caso da krigagem ordinária, a hipótese subjacente é que os dados apresentam distribuição gaussiana, e neste caso as propriedades ótimas dos estimadores (como a mínima variância do resultado) são garantidas. O Índice de Dependência Espacial (IDE) foi calculado através do proposto por Zimback (2001), é considerada fraca onde valores menores ou iguais a 25 % , moderada de 26% a 75%, e dependência forte maiores ou iguais a 75 %.

2.2. 2 - Modelos de predição da recarga subterrânea

Para o estudo de como as propriedades do solo, as características climáticas e a relação aquífero- rede de drenagem consideradas, interferem nos processos de recarga na bacia utilizou-se a metodologia proposta por Hengl (2009). Primeiramente, procurou-se estabelecer um modelo explicativo para os níveis de recarga em cada poço em função das propriedades dos solos amostradas nos seus entornos. A variável resposta foi a amplitude anual dos níveis freáticos para os 23 poços de monitoramento disponíveis na bacia nos anos de 2011-2012, calculada através do método de flutuação da superfície piezométrica (WTF - Water Table Fluctuation), conforme descrito em Healy (2010). Como variáveis explanatórias foram utilizadas: condutividade hidráulica (k), índice de cone, textura (conteúdo de argila, silte e areia) e granulometria (fração areia). A partir desse conjunto de dados iniciou-se a investigação de acordo com o fluxograma da Figura 3, proposto por Hengl (2009):

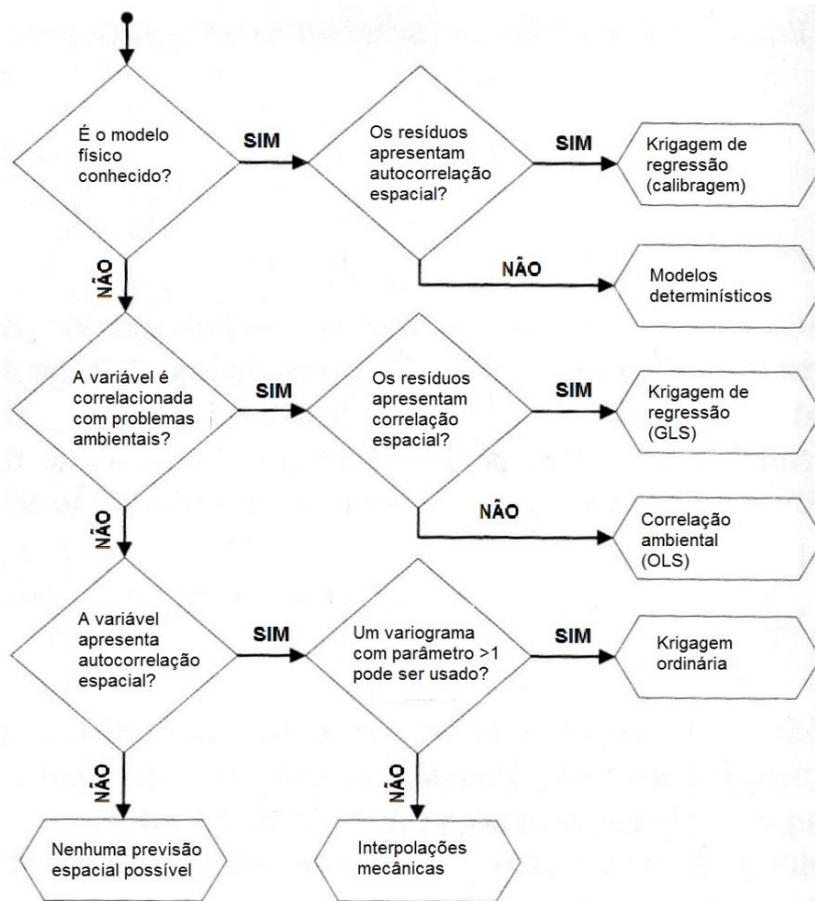


Figura 3. Fluxograma conceitual para definição de modelos de predição espacial.
Fonte: Hengl (2009).

Essa proposta vem sendo aplicada em trabalhos que integram diferentes fontes de informação auxiliar para melhorar estimativas de variáveis amostradas em menor densidade ou integrar diferentes planos de informação (McKENZIE e RYAN, 1999; HENGL et al., 2004; MANZIONE b et al., 2007). Observando que a autocorrelação espacial, entre os resíduos do modelo foi baixa, procurou-se utilizar um modelo determinístico, como a regressão linear.

2. 2. 3 - Definição do modelo

O objetivo de uma análise de regressão é mensurar a relação entre uma variável resposta dependente (Y) e um conjunto de variáveis explicativas independentes (X1, X2,...). De acordo com Lourenço e Landim (2004), o método mais comum que pode ser adotado é o da análise de regressão linear simples que fornece a equação da reta (Equação 3):

$$Y = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i \quad (3)$$

Onde α e β são constantes desconhecidas a serem determinadas e ε_i representa toda a fonte de variabilidade em Y não explicada por X . Como foram utilizadas mais de uma variável, foi utilizada a regressão linear múltipla.

O formato geral da equação de regressão linear múltipla, segundo Lourenço e Landim (2004), está representado na Equação 4:

$$Y = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 \dots + \beta_i x_i + \varepsilon_i \quad (4)$$

Cada coeficiente $\beta_i x_i$ representa a alteração em Y quando x_j é alterado em uma unidade, quando todas as outras variáveis regressoras, são mantidas constantes.

2. 3 Análise Integrada dos dados

Para identificar de fato, a influência em conjunto das variáveis, após mapeá-las por IDW, foi necessário padronizar os dados, já que as variáveis possuíam, unidade de medida, diferentes. Para essa padronização utilizou-se a lógica fuzzy.

Sendo assim a lógica Fuzzy, pode ser considerada como, princípios matemáticos para análise, e representação de dados, com base no grau de pertinência das variáveis. Para Borrough, 1989, fuzzy trata-se de uma imprecisão característica de classes, que podem ou não ter limites definidos, desta forma normalmente o termo fuzzy é associado com complexidade. Posteriormente, foram empregadas técnicas computacionais de geoprocessamento, para análise de dados.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 - Elaboração de um modelo preditivo para oscilação dos níveis freáticos

Antes da elaboração do modelo foi feita uma matriz de correlação a fim evitar utilizar no modelo de variáveis altamente correlacionadas. A partir dessas variáveis

levantadas, foi realizada a análise de regressão múltipla, para que fosse encontrado um modelo capaz de prever a recarga. Um modelo eficiente para prever a recarga em uma bacia hidrográfica, a partir desse tipo de informação e alguns poços de monitoramento, sem que seja necessária a perfuração de poços, se faz-se interessante uma vez que essa técnica é bastante onerosa e demanda um trabalho constante nas medições.

Para elaboração desse modelo procurou-se obedecer aos seguintes aspectos:

- modelo simples;
- modelo parcimonioso;
- modelo com o menor número de variáveis possível;
- modelo com variáveis de coleta simples;
- modelo com variáveis de maior acurácia de análise;
- modelo com coeficientes significativos estatisticamente;
- modelo com resíduos de distribuição normal e média zero;
- modelo com significado físico no sentido de explicar o fenômeno;

Esses aspectos visaram à busca de um modelo que pudesse de fato explicar a recarga, no intuito de facilitar a previsão de cenários e comportamento das águas subterrâneas, contribuindo como uma ferramenta eficiente para gestão das águas subterrâneas em áreas de afloramento do SAG. A priori foram utilizadas no modelo todas as variáveis, a fim de buscar entre elas as que mais fossem significantes na resposta dos níveis. Utilizou-se de técnicas de stepwise (NETER et al., 1996) para verificar o melhor conjunto e possíveis efeitos de interação. A partir dessas técnicas elaborou-se um best subset, onde pode –se observar as melhores combinações

entres as variáveis a partir da observação do R^2 , R – ajustado e C-p de Mallows. Encontra-se na literatura diversos métodos para se escolher a combinação correta ou então chamado modelo, entre variáveis, tais como o coeficiente de determinação (R^2), o coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajustado), o quadrado médio dos resíduos (QMR) e a estatística de Mallows (Cp). De acordo com Teixeira et al. (2013), um valor baixo de Cp indica que o modelo é relativamente preciso e possui variância pequena na estimativa verdadeira dos coeficientes da regressão e na previsão de respostas futuras. Desta forma o modelo escolhido, baseou-se na menor quantidade de variáveis, com melhor ajuste de C-p de Mallows e R^2 ajustado, a partir das combinações da Tabela 1.

Tabela 1. Best subset para escolhas do melhor conjunto de variáveis.

Vars	R- Sq	R- Sq(adj)	C-p	S	Ar	Sil	AG	AM	AF	AMF	Kc	DD	E	Decl	Res_ Med	Res_ Máx	PMC	K	Arg
1	35,0	31,2	-0,1	2,1165									X						
1	32,6	28,2	0,4	2,1560			X												
2	59,0	53,9	-3,6	1,7320	X							X							
2	53,1	28,6	-2,3	1,8539	X								X						
3	61,7	53,9	-2,3	1,7290	X							X	X						
3	61,6	47,2	-2,2	1,7326	X														
4	66,5	54,1	-1,3	1,6758						X				X	X	X			
4	66,0	53,9	-1,2	1,6863	X			X	X			X							
5	73,0	56,9	-0,8	1,5590	X					X				X	X	X			
5	71,3	56,3	0,4	1,6088	X				X	X		X							X
6	76,9	62,7	1,9	1,5029	X					X				X	X	X			
6	76,3	60,2	1,9	1,5223	X				X	X	X	X			X				
7	78,7	65,3	3,5	1,5076	X		X					X		X	X	X			
7	78,6	64,4	3,6	1,5105	X				X	X	X	X		X	X	X			
8	80,2	65,1	5,3	1,5231	X														
8	79,7	65,0	5,4	1,5410	X														
9	81,2	64,4	7,2	1,5664	X					X		X	X	X	X	X	X		
9	80,8	63,5	7,2	15804	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
10	81,6	62,3	9,1	1,6446	X				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
10	81,5	61,6	9,1	1,6461	X		X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	
11	81,9	58,5	11,1	1,7391	X		X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	
11	81,9	58,4	9,1	1,7417	X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
12	82,4	53,5	11,0	1,8520	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
12	82,1	53,4	11,1	1,8717	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	
13	82,5	47,3	13,0	2,0258	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	

Ar = Areia, Sil=Silte, AG= Areia Grossa, AM= Areia Media, AF= Areia Fina, AMF = Areia muito fina, Kc = Coeficiente de cultura, DD= distância de drenagem, E= Elevação do terreno, Decl = Declividade, Res_Med = Resistência média do solo `a penetração, Res_Max = Resistencia máxima do solo `a penetração, PMC= Profundidade de máxima compactação, K = permeabilidade do solo, Arg = Argila.

A partir dessa análise foram indicadas as variáveis de maior relação com a resposta, e as variáveis escolhidas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros do modelo de regressão ajustado para o variável alvo.

	Estimado	Erro ²	P(> t)
Intercepto	45,3	10,97	1,0E-2***
Ar	-0,03	0,01	0,02***
AF	-0,16	0,09	0,07***
AMF	0,14	0,08	0,01**
DD	1,12E -3	5,6E-3	2,0E-2**
KC	-8,75	5,51	0,14
Res	-2,5E-2	1,2E-2	0,06

*** significativo 0,005; ** significativo 0,01; Ar= Areia, AF= Areia fina, AMF=Areia muito fina, DD=Distância de drenagem, Kc = Coeficiente de cultura, Res= Resistência média do solo a penetração.

O modelo matemático estabelecido a partir destas variáveis apresentou erros baixos em relação aos valores estimados, e os valores observados, estatisticamente o modelo mostrou-se significativo ($p < 0,005$)

Foram selecionadas 6 variáveis que explicam a recarga, sendo assim um modelo simples, entretanto essas variáveis conseguem representar inúmeros aspectos de influência na recarga, sendo, portanto parcimonioso, ao levar em consideração, aspectos de cultura (Kc) , condição textural (AR, MF, AMF) e condição estrutural do solo (Res_Med) e relação aquífero – rede de drenagem (DD) existindo assim um sentido físico no modelo, e não puramente matemático. A curva de normalidade dos dados entre o valor estimado e o predito apresentou bom ajuste (Figura 4), essa curva vai mostrar o quão distante está um dado observado em campo, do mesmo dado calculado no modelo, a partir dela pode-se verificar, se os dados preditos estão muito longe dos coletados, quanto mais próximos da reta, estiverem os pontos mais normalidade há, ou seja, representa a variação entre o

real e o estimado pelo modelo, neste caso pode-se inferir que os dados possuem normalidade, pois estão próximos a reta, comprovando a significância do modelo.

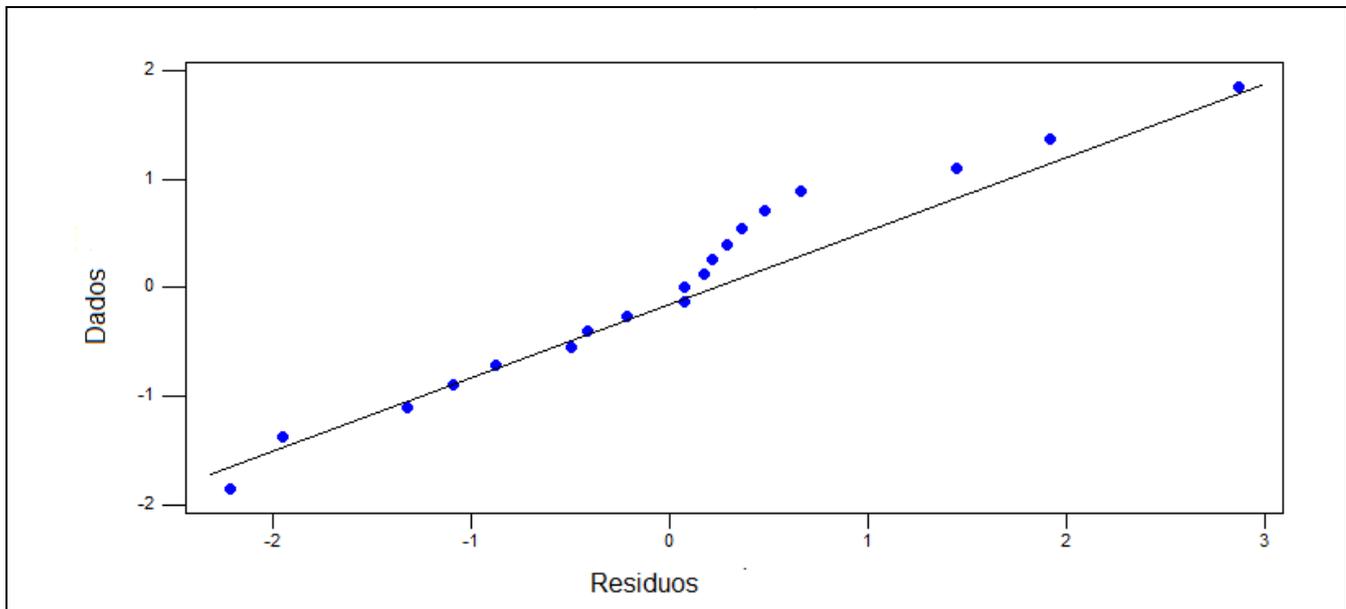


Figura 4: Gráfico de normalidade entre os dados observados e preditos.

Na Figura 4, observa-se que os valores observados, representados pela reta, estão bem próximos do estimados. Mas para garantir a confiabilidade do modelo foi feita análise dos seus resíduos, através da análise de variância Anova (Tabela 2).

Tabela 2. Análise de variância Anova para os resíduos do modelo.

Fonte de variação	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados dos resíduos	Razão F	Teste F(0,05)
Modelo	6	89,38	6,43	0,00
Resíduos	12	27,81		
Total	18	117.19		

O teste F, para uma regressão, identifica se existe uma relação linear entre a variável resposta e os resíduos das variáveis preditoras, demonstrando assim a adequabilidade do modelo. Caso seu valor seja menor que 0,05, rejeita-se a hipótese H_0 e tem –se que; ao menos uma das variáveis contribui significativamente para o modelo, também as médias das variáveis não são iguais, sendo possível

utilizá-las no modelo sem que haja redundância de informações. O gráfico de distribuição dos resíduos mostra que, não há tendência entre os dados (Figura 5).

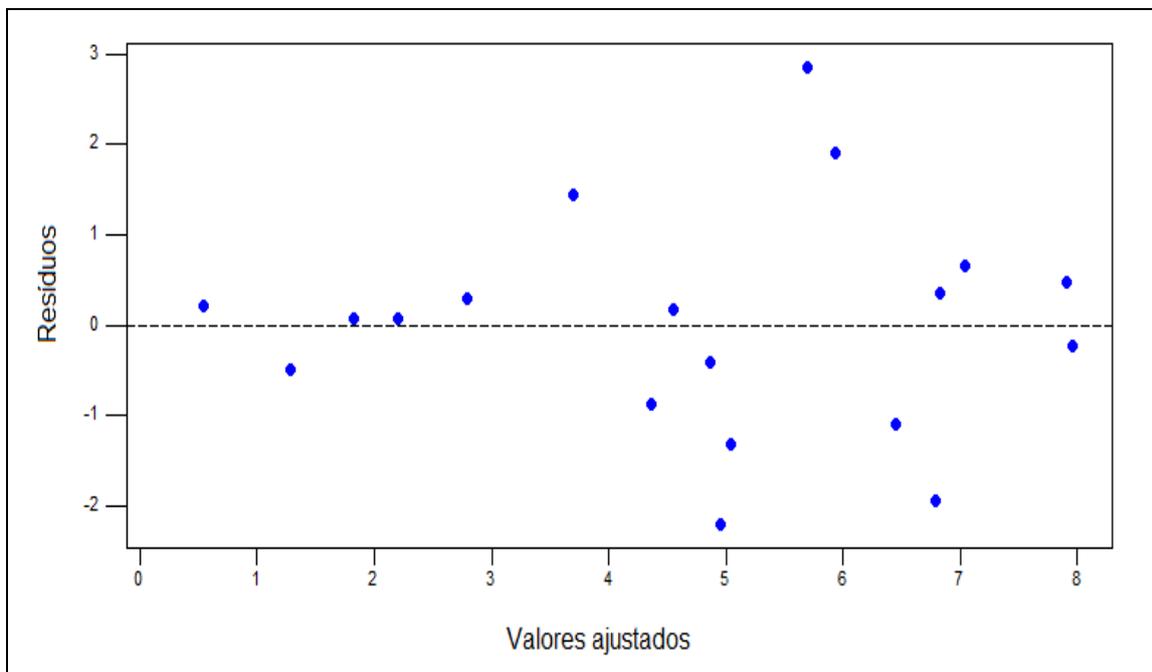


Figura 5: Gráfico de dispersão dos resíduos.

Assim sendo o modelo escolhido foi a seguinte:

$$\mathbf{AH = (45,3 - 8,75 * Kc) + (0,00230 * DD) - (0,00255 * RP_Med) - (0,0283 * AREIA) + (0,141 * AREIA_MF) - (0,164 * AREIA_F)}$$

O coeficiente de determinação, avaliado a partir do R^2 , trata-se de uma medida de ajustamento de um modelo estatístico linear generalizado. O R^2 varia entre 0 e 1, indicando, em percentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Sendo assim, quando mais próximo de 1 mais explicativo é o modelo. O R^2 para este modelo foi de 0,76, denotando uma confiabilidade razoável ao modelo. Em um modelo de regressão, admitir inúmeras variáveis pode parecer um caminho correto na busca de melhor explicar a variável resposta. Isso pode muitas vezes aumentar o valor do R^2 , criando uma falsa impressão de confiabilidade do modelo, e fugindo do princípio da parcimônia. Para contornar esse efeito verifica-se o valor do R-ajustado que penaliza a inclusão de variáveis regressoras pouco

explicativas. No caso deste modelo, o R-ajustado apresentou valor de 0,65, abaixo do R^2 , entretanto ainda um valor significância para o modelo (comprovado na estatística p) para o modelo onde o valor encontrado foi de 0, 003.

Os diagnósticos estatísticos como significância dos coeficientes, normalidade dos resíduos e coeficiente de determinação validaram o modelo como aceitável do ponto de vista da inferência. Apesar disso, o modelo precisa fazer sentido quanto a física do processo a que se dispõe a explicar. Nesse ponto da análise a expertise do analista faz-se necessária para verificar se o comportamento das variáveis predictoras faz sentido quanto a variável alvo. Sendo assim, as variáveis de textura do solo (Ar, AF e AMF) fazem relação direta com o processo de infiltração, que vai determinar os movimentos da água no solo, assim como a resistência do solo a penetração (Res_Med), que também indica o potencial da água infiltrar ou não. Já o coeficiente de cultura (Kc) demonstra a influencia do uso do solo na recarga, uma vez que representa a necessidade hídrica dos diferentes cultivos, que vai interferir da disponibilidade água para recarga. A distância da drenagem em relação ao poço representa a interatividade do aquífero com o rio, mostrando que quanto mais perto, maior a colaboração entre eles. As variáveis escolhidas apresentam não só significância matemática, como também sentido físico, ao observar-se que o solo, acaba sendo o agente de maior influencia, já que se trata do mediador entre superfície e águas subterrâneas. A partir disto buscou-se modelar os resíduos através de técnicas geoestatísticas, a fim, de verificar em quais locais da bacia o modelo apresenta maior índice de incertezas em relação ao modelo.

3. 3. 1 - Interpolação geoestatística dos resíduos do modelo

O variograma ajustado para interpolação dos resíduos do modelo, pode ser observado na Figura 6 e seus parâmetros espaciais na tabela 3.

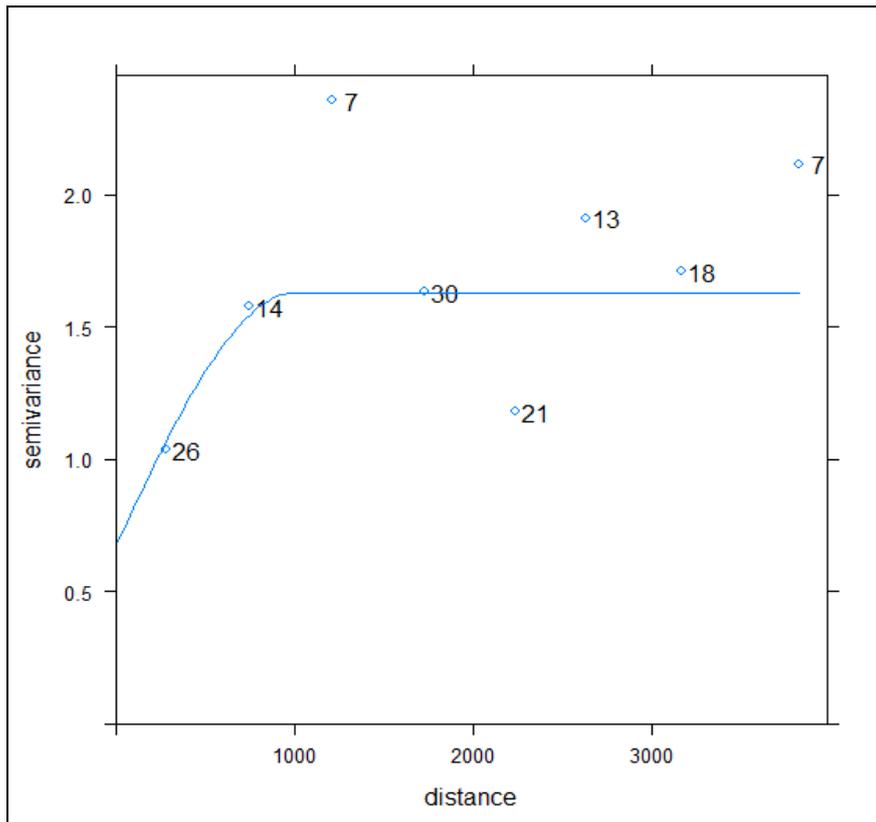


Figura 6: Variograma para análise da variabilidade espacial dos dados.

Tabela 3. Parâmetros espaciais do variograma.

Parâmetro	Efeito pepita	Patamar	Alcance	Modelo	Índice de dependência espacial (IDE)
Val	0	1	1	E	
or	,7	1	,5	sférico	70%

Para interpolação dos resíduos, o modelo de variograma que melhor representou a distribuição espacial dos dados foi o modelo esférico, os valores de efeito pepita, que representa o espaço da amostra que o variograma não consegue explicar a variância foi de 0.7, mostrando que o variograma explicou bem o modelo. O valor de patamar indicou que a influência aleatória dos dados inicia-se em 1, sendo um valor alto em relação aos dados, o que entretanto não indica falta de dependência espacial, já que o IDE neste caso foi de 70 %, indicando moderada dependência espacial. Havendo assim dependência há a possibilidade de se realizar

a krigagem dos dados. O mapa gerado pela interpolação, para os resíduos seguem na figura 7. Pode-se observar, que as informações concentram-se perto dos poços, mostrando que o interpolador não atingiu distâncias maiores, percebe-se também que na maior parte da bacia, os erros em relação ao modelo foram baixos, ou médios, sendo que apenas a Nordeste, houve alto grau de incertezas em relação ao calculado no modelo. Isso deve-se a concentração de dados nesses locais. Sendo assim, o modelo mostrou-se eficaz ao representar o processo de recarga subterrânea na bacia.

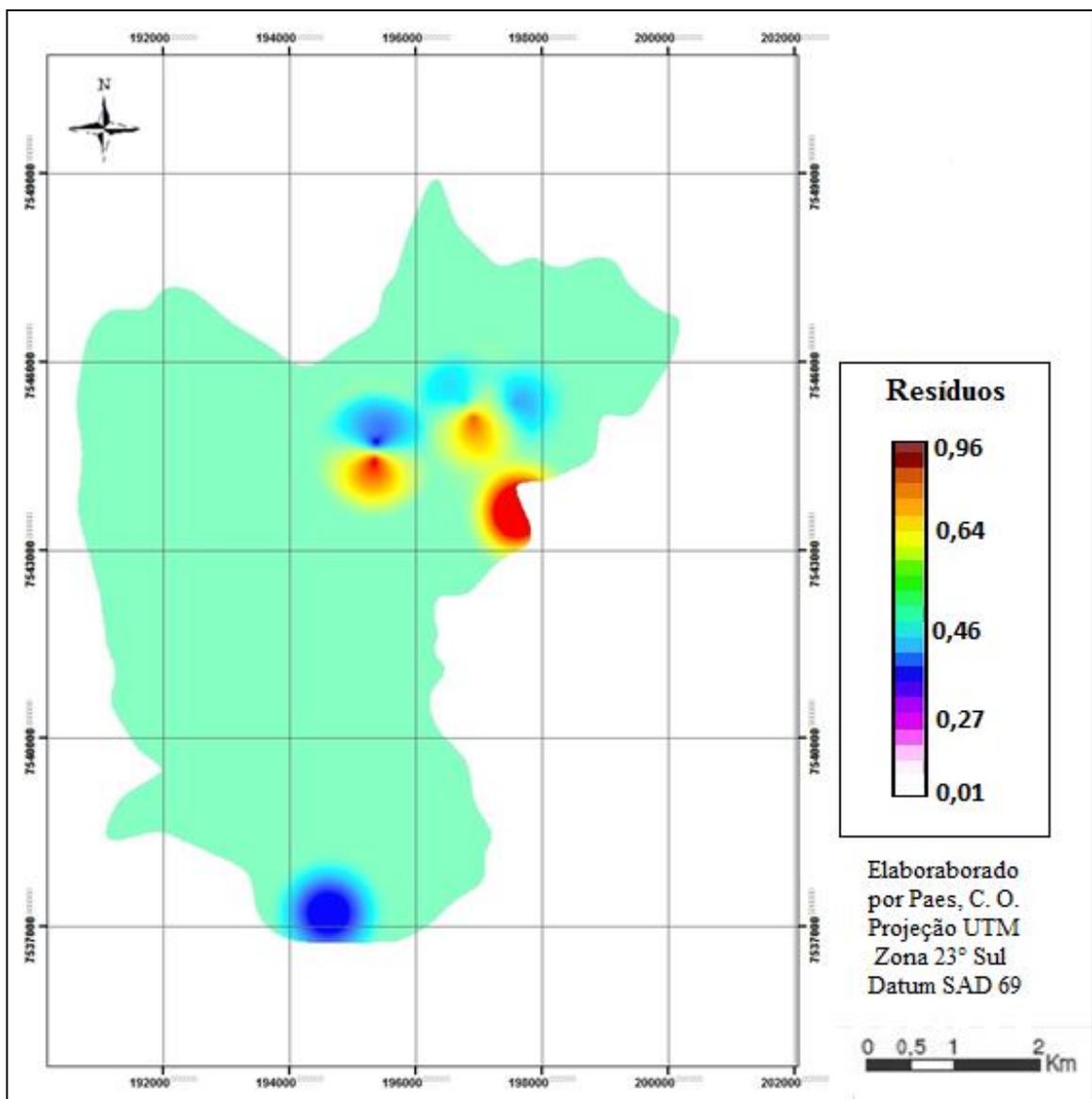


Figura 7 : Mapa de resíduos do modelo.

3. 4 – Análise Integrada dos dados

Para análise integrada dessas variáveis escolhidas, foi necessário antes mapeá-las, como nem todas apresentaram dependência espacial, para que empregasse técnicas de interpolação geoestatísticas, optou-se por um método de interpolação menos complexo, mas que fosse eficiente entre todas variáveis, o IDW.

3 4. 2 - Padronização dos mapas

Uma vez que, as variáveis foram mapeadas, o objetivo passou a ser analisá-las em conjunto, a fim de verificar a influência na recarga de forma geral, mas como as variáveis possuem diferentes unidades de medida, foi necessário padronizá-las, optando assim pelo método de fuzzificação, que transforma os dados de um conjunto numérico, para um conjunto difuso (de 0 a 1), em um intervalo que representa a pertinência dos dados. Levando em consideração a pertinência dos dados para análise em conjunto, a variável Areia, foi classificada de 0 a 1, ou seja, quanto maior a pertinência da areia na bacia maior será a recarga, entretanto se a porção de areia fina e muito fina forem altas, isso intercepta o processo de recarga, sendo quanto menor sua pertinência (mais próximo de zero) menor será a interferência na recarga, ocorrendo o mesmo com a resistência média do solo a penetração e a distância de drenagem, dessa forma o processo de fuzzificação para essas variáveis foi realizado ao inverso, sendo o intervalo de 1 a 0

3.5 - Análise em conjunto das variáveis

Com as variáveis todas padronizadas, foi possível manipular os mapas para uma síntese. Uma vez que uma das inferências da lógica fuzzy difusa é a pertinência dos valores optou-se por uma álgebra de mapas, reunindo todas as variáveis a partir de uma soma, onde a significância de cada variável para a recarga

foi relacionada com as demais. Como se trata de seis variáveis, e de intervalos entre 0 e 1, definiu-se que, quanto mais perto de seis maior seria a influência das variáveis na recarga (Figura 8).

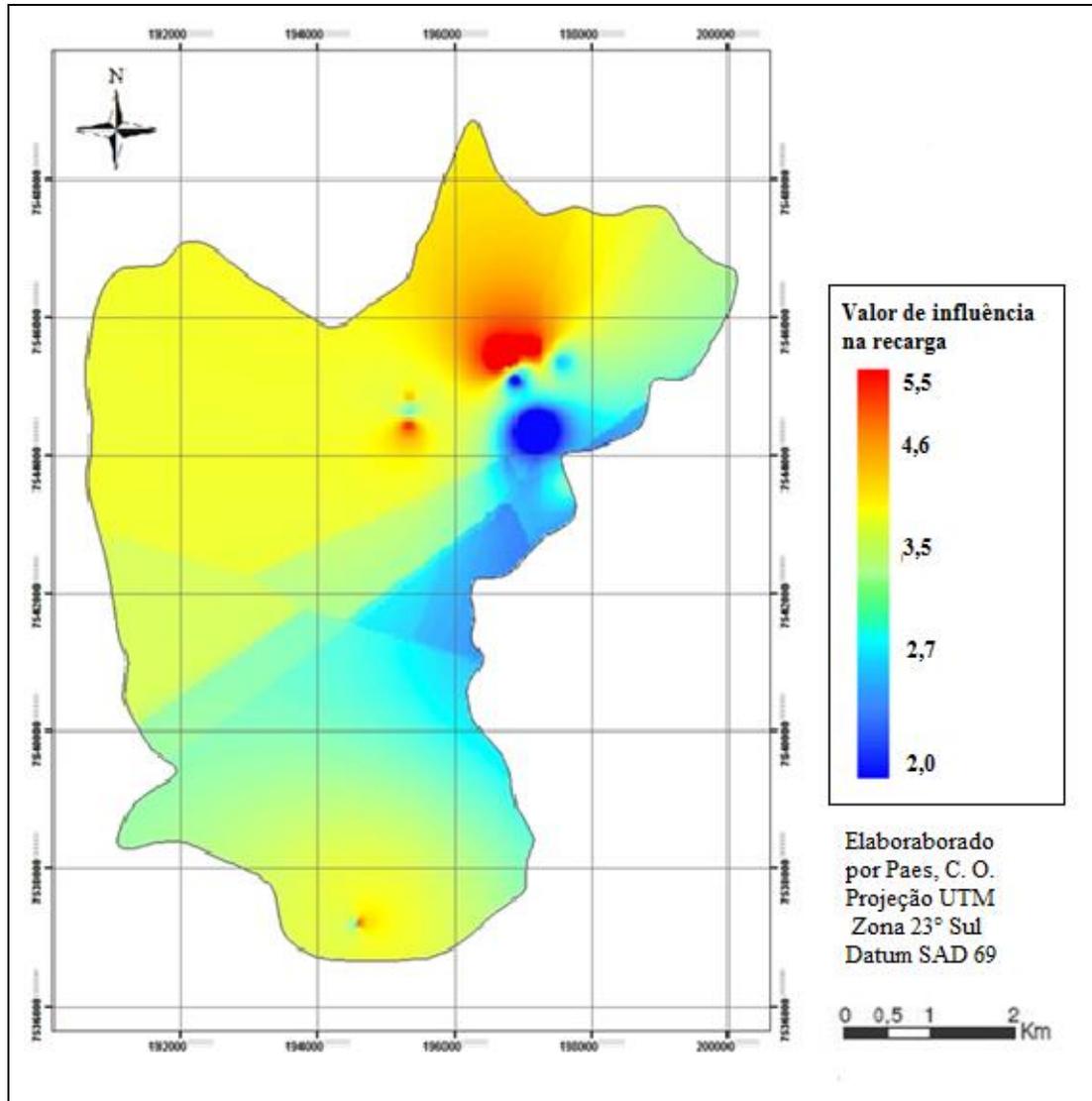


Figura 8. Mapa síntese do valor de influência das variáveis em conjunto.

Podemos observar no mapa de soma das variáveis, no leste da bacia encontram-se áreas de menor potencial de recarga. À Nordeste da bacia observa-se uma área de grande fragilidade, bem próximo a áreas de baixa fragilidade, isso se deve a mudança de uso do solo, e também ao fato de que estão em margens opostas do Rio, na maior parte da bacia observa-se uma média influência das variáveis no potencial de recarga. Para facilitar a delimitação das áreas com maior e

menor fragilidade de recarga na bacia, foram definidas classes, e feita uma reclassificação do mapa de soma (Figura 9).

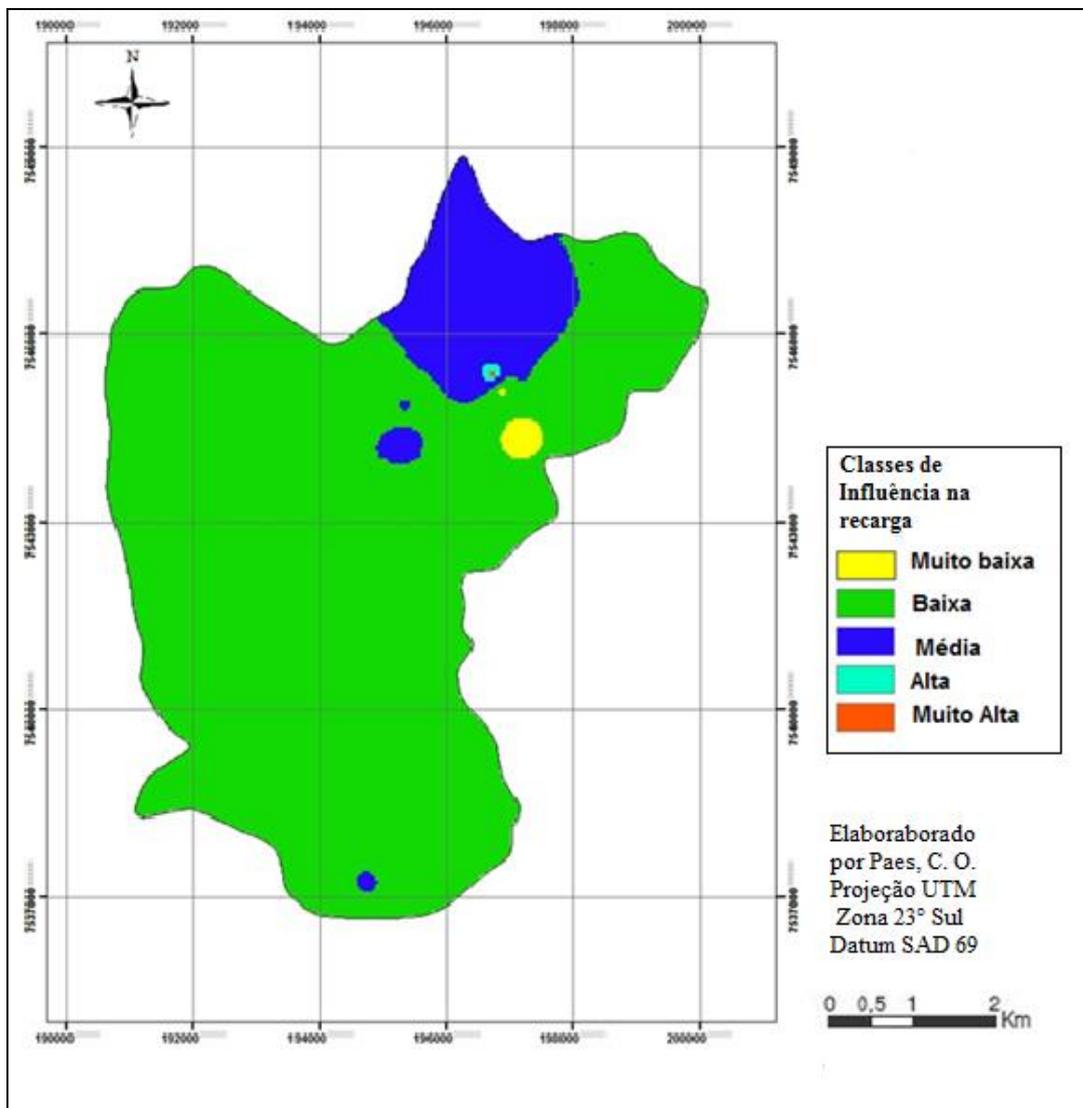


Figura 9 Mapa de classes de influência das condições de superfície na recarga do aquífero na Bacia do Ribeirão da Onça.

As classes definidas foram; muito baixa e baixa, para áreas onde o conjunto de variáveis apresentou características favoráveis à recarga. Classe média, para áreas onde essas características não prejudicam a recarga de forma acentuada, porém requer um maior manejo do uso do solo, para que não haja maiores influências. Classe alta e muito alta para áreas onde as características naturais, juntamente com aspectos de uso do solo, e interação rio-aquífero, que foram as variáveis utilizadas, apresentam grande influência de forma negativa para a recarga,

sendo áreas desfavoráveis. Nessas áreas torna-se importante uma gestão mais apurada, principalmente do uso do solo, para assim garantir a recarga no local. Ao comparar o mapa de classe de potencial de recarga, com o mapa de uso de solo de Tanikawa e Manzione (2011), observa-se que as áreas em que a influência no potencial de recarga é muito baixa, são justamente áreas onde a cobertura vegetal é mata nativa, entretanto áreas com pastagens, eucalipto, citros e cana-de-açúcar, também apresentaram influência baixa, isso pode ser explicado pela alta presença da fração areia, nos solos da bacia, que por possuírem que facilitam a infiltração. Dessa forma nessas áreas, a influência dos cultivos não exercem tanta pressão no potencial de recarga. A influência média no potencial de recarga, está presente em áreas com presença de eucalipto e cana-de-açúcar. Em relação ao eucalipto, Dedecek e Gava (2005), ressaltam que, o eucalipto quando mais novo, apesar de ter sofrido recentemente com tráfego intenso de máquinas, teve a camada superficial do solo revolvida para plantio, isso torna a compactação mais baixa, na camada superficial, já o eucalipto adulto, já passou desse processo inicial, e levando em consideração a alta lixiviação que o eucalipto provoca no solo, durante seu desenvolvimento, torna mais preocupante a influência negativa deste tipo de solo nos processos de recarga. Dessa forma, mesmo em fases tão distintas de desenvolvimento do eucalipto, a pressão exercida no processo de infiltração é grande. Já onde a influência se mostrou como, alta ou muito alta, são áreas de cultivo de citros, que historicamente é presente na bacia. Esse tipo de cultivo apresenta em seu manejo, de acordo com Paes e Manzione (2012), e o citros apresenta em seu manejo intenso tráfego de máquinas pesadas em todas as fases de seu crescimento, desde plantio, até colheita, ainda de acordo com Fidalski et al. (2007), a maior parte dos citros exige sistema convencional de plantio, aumento

assim a compactação em camada mais profundas do solo, pelo intenso uso de maquinário pesado.

Esse tipo de mapa, deve ser empregado no planejamento do uso de áreas de afloramento, evidenciando quais locais possuem mais tendências naturais a responder negativamente na recarga, para assim definir-se a capacidade de uso do solo, em relação não somente aos recursos naturais superficiais, mas também as águas subterrâneas que na atual conjuntura de crise hídrica, reafirma seu papel de garantia de abastecimento, definindo-se assim os tipos de cultivos, em relação a sua exigência de manejo, hídrica, e influência nas propriedades do solo.

Em locais, onde o uso do solo, não foi feito com prévio planejamento, uma ferramenta como esse modelo, e os mapas gerados a partir dele, servem como base de gestão para que se visualize as áreas que necessitam maior atenção no manejo, atuando no emprego de técnicas de rotação de cultura por exemplo, para evitar influências negativas na área de recarga.

Áreas de afloramento de aquífero que foram degradadas, e por isso comprometem a recarga, podem utilizar esse tipo de método, para localizar diferentes necessidades de recuperação, empregando de forma correta a remediação, evitando a generalização, uma vez o solo, influi diretamente no processo de recarga, e possui alta variabilidade em seus atributos.

Assim sendo, laudos e estudos ambientais, quando tratam da utilização de recursos naturais, como solo e água, devem entender o cenário em questão em sua totalidade, entendendo que há um equilíbrio dinâmico em todo o meio, e que toda ação realizada em superfície, tem uma resposta direta na águas subterrâneas, pois desenvolvimento sustentável, necessita dessa visão integradora para que de fato seja aplicado.

4. CONCLUSÕES

Diante do verificado, observa-se que o modelo encontrado, tem grande potencial para explicar o fenômeno da recarga. Quando se busca, modelar variáveis relacionadas ao solo, sabe-se que há grande variabilidade nos valores coletados, uma vez que o solo muda muito em pequenas distâncias, e isso influencia muito os parâmetros estatísticos encontrados, portanto ao analisar um modelo que investigue a influência de variáveis do solo na recarga subterrânea, a expertise do profissional é de grande importância, ao analisar não somente os parâmetros estatísticos do modelo, mas também seu sentido físico para determinar e responder um fenômeno.

As variáveis escolhidas apresentaram boa representação de sentido físico para a recarga, seguindo os princípios da simplicidade e da parcimônia, necessitando de algumas investigações mais profundas em determinadas variáveis como compactação do solo. Os parâmetros estatísticos avaliados elucidaram a confiabilidade do modelo. A interpolação dos resíduos demonstrou que não há alto grau de incerteza na bacia em relação ao modelo. Permitindo assim utilizá-lo para mapeamento das áreas de maior e menor fragilidade recarga.

Observa-se que a maior classe encontrada em relação a fragilidade, foi classificada como de baixa fragilidade, o que significa que não se faz necessário a gestão e manejo dessa área. Sabe-se que toda áreas de recarga e por natureza regiões de grande fragilidade em sua dinâmica natural. Esses aspectos visaram à busca de um modelo que pudesse de fato explicar a recarga, para que assim a produção desses mapas possam facilitar a previsão de cenários e comportamento das águas subterrâneas, contribuindo como uma ferramenta eficiente para gestão das águas subterrâneas em áreas de afloramento do SAG

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. MARTIN S. **Crop evapotranspiration**. In: FAO, Irrigation and Drainage Paper. FAO, v.56, 297p. 1998.
- BARRETO, C. E. A. G. **Balço hídrico em zona de afloramento de Sistema Aquífero Guarani a partir de monitoramento hidrogeológico em bacia representativa**. 2006, 249 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia de São Carlos, (Universidade de São Paulo) São Carlos, 2006.
- BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment – Monograph on Soil and Resource**. Oxford: Claredon, 194p. 1989.
- CONTIN NETO, D. **Balço hídrico em Bacia Hidrográfica situada em Região de Recarga do Aquífero Guarani**. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). EESC-USP, São Carlos, SP. 1987. 130 p.
- CUNHA, A. T. **Estimativa experimental da taxa de recarga na zona de afloramento do Aquífero Guarani, para a região de São Carlos – SP**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). EESC-USP, São Carlos, SP. 117p. 2003.
- DEDECEK, R. A; GAVA, J. L. Influência da compactação do solo na produtividade da rebrota de eucalipto. **Revista Árvore**, vol. 29, nº3, p. 383-390, Viçosa-MG, 2005.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2013.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1997.
- ELRICK, D. E.; REYNOLDS, W. D.; TAN, K. A. Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses. **Ground Water Monitoring Review**. v. 9, p. 184-193, 1989.
- ELRICK, D. E.; REYNOLDS, W. D. Methods for analyzing constant-head well permeameter data. **Soil Science Society of American Journal**, v.56, p.320-323, 1992.
- FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; SCAPIM, C. A. Espacialização vertical e horizontal dos indicadores de qualidade para um latossolo vermelho cultivado com citros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 31, p. 9-19, 2007.
- GIAMPÁ, C. E. Q.; SOUZA, J. C. Potencial Aquífero dos Basaltos da Formação Serra Geral no Estado de São Paulo. **Revista DAE**, v.42 (131), p.67-72, 1982.
- GOMES, L. H. **Determinação da recarga profunda na bacia-piloto do Ribeirão da Onça em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir de balanço hídrico em**

zona saturada. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento). EESC-USP, São Carlos, SP.

HEALY, R. W. **Estimating groundwater recharge.** Cambridge: Cambridge University Press, 245p., 2010.

HENGL, T.; GRUBER, S.; SHRESTHA, D.P. Reduction of errors in digital terrain parameters used. IN soil-landscape modelling, **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.5, p.97-112, 2004.

HENGL, T. **Pedometric mapping; bridging the gaps between conventional and pedometric approaches.** Enschede: ITC; Netherlands, 214p., 2009.

ISSAKS, E. H.; SRIVASTAVA, M. **An introduction to applied geostatistics.** New York: Oxford University Press, 560p.,1989.

LOURENÇO, R. W.; LANDIM, P. M. B. Análise de regressão múltipla espacial. **UNESP/Rio Claro, IGCE, DGA, Lab. Geomatemática, Texto Didático 13, 34 pp. 2004.** Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acesso em: 22 de Maio de 2013.

MANZIONE, R. L. Regionalized spatio- temporal modeling of water table depths in the Brazilian Cerrado. 2007. 141 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2007.

MANZIONE, R. L. ; MARCUZZO, F. F. N. ; [WENDLAND, E. C.](#) **Integração de modelos espaciais e temporais para predições de níveis freáticos extremos.** Pesquisa Agropecuária Brasileira (1977. Impressa), v. 47, p. 1368-1375, 2012

McKENZIE, N.J., RYAN, P.J. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. **Geoderma**, v.89, p.67– 94, 1999.

NETER, J.; KUTNER, M. H.; NACHTSHEIM, C. J. & WASSERMAN, W., eds. **Applied linear statistical models.** 4.ed. Chicago, 1408 p., 1996.

PAES, C. O., MANZIONE, R. L. **Influência do uso e manejo dos solos nos mecanismos de recarga das águas subterrâneas em uma bacia hidrográfica em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG).** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) - UNESP/Campus Experimental de Ourinhos, 110 p. 2012.

TANIKAWA, D. H.; MANZIONE, R. L. Análise da correlação entre a resposta espectral da cultura de eucalipto e oscilação de níveis freáticos em área de recarga do sistema aquífero guarani. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNESP, XXIII., 2011, São Pedro. **Anais...** São Pedro: UNESP, 2011.

TEIXERA, D. B.; PANOSSO, A. R.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA Jr.; N. Comparação entre métodos de interpolação na determinação de propriedades físicas de um latossolo. In: SIMPÓSIO DE GEOESTATÍSTICA APLICADA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS, 1. **Anais...** Botucatu, 4 p. 2009

WENDLAND, E, BARRETO, C. E. A. G., GOMES, L. H. Water balance in the Guarani Aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring. **Journal of Hydrology**, v. 342, p. 261-269, 2007.

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

O resumo aqui apresentado é de responsabilidade exclusiva de seu autor, sendo uma cópia fiel do resumo contido no documento final defendido e aprovado em sua instituição de origem.