

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JULIO DE MESQUITA FILHO
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

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

CLAUDIANE OTILIA PAES

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp – Câmpus de Botucatu, para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

BOTUCATU-SP
Outubro – 2014

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JULIO DE MESQUITA FILHO
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

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

CLAUDIANE OTILIA PAES

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Lilla Manzione

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp – Câmpus de Botucatu, para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

BOTUCATU-SP
Outubro – 2014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Paes, Claudiane Otilia, 1989-
P126m Modelagem espacial de áreas de recarga subterrânea em região de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG), em Brotas/SP / Claudiane Otilia Paes. - Botucatu : [s.n.], 2014
xii, 87 f. : fots. color., grafs., ils. color., tabs.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2014
Orientador: Rodrigo Lilla Manzione
Inclui bibliografia
1. Recursos hídricos. 2. Análise espacial (Estatística).
3. Hidrogeologia. 4. Comparações múltiplas (Estatística).
I. Manzione, Rodrigo Lilla. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: MODELAGEM ESPACIAL DE ÁREAS DE RECARGA SUBTERRÂNEA
EM REGIÃO DE AFLORAMENTO DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI
(SAG) EM BROTAS/SP**


ALUNA: CLAUDIANE OTILIA PAES

ORIENTADOR: PROF. DR. RODRIGO LILLA MANZIONE

Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. RODRIGO LILLA MANZIONE



PROF. DR. CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK



PROF. DR. EDSON LUIS PIROEL

Data da Realização: 16 de dezembro de 2014.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem, foram conquistadas do que parecia impossível”.

Charles Chaplin

Portanto meus caros: “ao infinito e além!”

Buzz Lightyear

*Ofereço, à minha mãe Anita, pelo apoio e
dedicação, por todo amor que tens por mim,
por ser porto seguro em todas a horas.*

Dedico à Minha irmã Daiane, por ser minha melhor metade, por tornar minha vida mais feliz desde o dia em que chegou. Pela doçura e meiguice de ser sempre minha irmãzinha, e por sempre acreditar no meu sucesso.

Ao Patrik, pela dedicação, cumplicidade e paz, que me proporciona todos os dias.

E ao meu querido Avô Antônio, pelos sábios e valiosos conselhos que sempre me ofereceu.

Menção especial

Algumas vezes a vida nos dá presentes inesperados, em forma de pessoas, que provavelmente são anjos de luz, trazidos a nós para ajudar a iluminar nosso caminho, tornando o percurso mais fácil. Foi assim nossa caminhada durante o mestrado, amizade que começou no primeiro dia de aula, e que foi fundamental e edificante, baseada em ajuda mútua, crescemos juntas no meio acadêmico, seguramos forte uma a mão da outra nos tropeços científicos. E chegamos juntas ao final deste ciclo, entendendo em um sentido muito mais amplo e complexo a palavra companheirismo.

Minha parceira querida Joyce Reissler.

Agradecimentos

Gostaria primeiramente de agradecer à Deus, por tudo que me tens me proporcionado nesses 7 anos de vida acadêmica.

A minha Mãe Anita e irmã, por todo amor, carinho e dedicação, por serem base e estrutura da minha existência

A minha madrinha Jana, pelos conselhos, por estar sempre presente na minha vida, pelo apoio valioso nas horas difíceis, pela preocupação maternal que sempre teve por mim.

A minha tia Alzira, por tudo que fez em vida, pois serei eterno reflexo de seus ensinamentos.

Ao meu orientador Rodrigo Lilla Manzione, por todo conhecimento repassado nesses 7 anos de orientação, por ter me dado a oportunidade de chegar até aqui, pela paciência e motivação.

A Professora Célia Zimback, por toda ajuda acadêmica no desenvolvimento do meu projeto e conhecimento durante o mestrado, por toda solicitude, pela grandeza de seus ensinamento sobre geoestatística, e por ser parte da banca, contribuindo ainda mais para o desenvolvimento da dissertação.

Ao Professor Edson Piroli, por aceitar fazer parte da banca colaborando assim com este estudos, e por tantas outras colaborações, por toda ajuda e orientação quanto ao geoprocessamento e pelo preciosos conselhos profissionais.

A FCA, pela oportunidade do curso de mestrado. E aos Professores João Saad, Rodrigo Román, Klar, Pádua, Sérgio Campos, Luís Zocoler, Raimundo, por todo conhecimento repassado durante o curso.

A Fundação de Amparo à pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp), pelo financiamento desta pesquisa.

Ao grupo de estudos GEPAG, pela oportunidade de ter sido membro, desfrutando de grande conhecimento, colaboração e companhia, em especial ao Diego Campos, por sempre estar disposto a ajudar, ensinar e motivar, por toda ajuda que me ofereceu desde início do meu mestrado. Ao Donizetti pela companhia no laboratório e grande ajuda na confecção dos mapas. Ao Juliano e ao Buri, pelo sábios conselhos e ótimas conversas. A Paula, por ajuda e companheirismo.

Ao grupo de estudos LabH2O, pelo companheirismo, ajuda, e incentivos na caminhada, obrigada meninas; Bruna, Daniela, Rita, e Aira, em especial pela enorme colaboração na finalização da dissertação.

As minhas amigas queridas de Cerqueira César, Elaine, por toda força, incentivo, conselhos, e pela importante ajuda com matemática, que possibilitou a melhor compreensão das disciplinas cursadas; Renata, pelas boas risadas e piadas frente as lamentações acadêmicas, e pela ajuda gramatical na redação dessa dissertação.

A Fabiane, por todo carinho, e incentivo.

Aos meus queridos amigos Geógrafos da Unesp de Ourinhos, que fizeram parte da minha formação inicial, e continuam presentes alegrando meus dias, amizades que se concretizaram no tempo e no espaço, Mariane, Amanda, Ana Paula, Manoel, Renata, Edson, Camila Al Zaher, Diego Nohal e Régis.

Aos queridos amigos de Botucatu, por terem feito desses dois anos, os mais alegres da minha vida.

A minha querida Anny, pela amizade, risadas, festas, pelo ombro amigo, nas horas difíceis, por sempre ter a solução do problema.

A Janaina, querida irmã, pela companhia na aventuras botucatuenses, por estar sempre disposta a me ajudar, pelas risadas, por ter estado presente em todos os dias.

A Priscila, pela ótima companhia, pela alegria que trás sempre consigo, por sem amiga de todas as horas.

Ao João Victor e Rodrigo Sereia, pelo companheirismo, amizade, conversas, conselhos, pelas risadas multiplicadas e pelas tristezas compartilhadas. Por serem amigos tão queridos. Ao João Victor em especial , por me emprestar sua mãe, Cláudia, nos momentos complicados em Botucatu.

Aos queridos amigos da República Alagoas, por proporcionar tantas alegrias.

Aos queridos Carla, Rodolpho (Pooh), Fernando (Toca), Rai, Stéfani (Mukeka), Ana Paula, e Mariana por terem tornando Botucatu tão especial.

É muito importante agradecer aqueles que fizeram parte de nossa história, afinal ninguém chega a lugar nenhum sozinho.

Sumário

RESUMO	1
SUMMARY	2
1- INTRODUÇÃO	3
2	6
- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 - Disponibilidade hídrica no mundo	6
2.2 -Águas subterrâneas	7
2.2. 1 -Sistemas Aquíferos	9
2. 2. 2- Sistema Aquífero Guarani.....	10
2. 2. 3 - A importância das áreas de recarga	14
2. 3 - Relação entre, o solo e a dinâmica hídrica na área de recarga	15
2. 3.1 -Propriedades físicas do solo.....	15
2. 4 -Propriedades físicas e mecânicas do solo, e sua influência do movimento da água e na recarga do aquífero.....	17
2. 5 -O uso de modelos de predição espacial dos atributos do solo.....	20
2.6 - Integração de informações no modelo de predição espacial	22
2. 6. 1- Análise de Regressão	23
2. 6. 2 - Regressão Múltipla	24
2. 7 - Mapeamento das variáveis pelo método IDW.....	25
2.8 - Lógica fuzzy	25
2.9 - Técnicas de Geoprocessamento.....	28
3 - MATERIAIS E MÉTODOS	30
3. 1 - Área de estudo	30
3. 1. 2 - Localização	30
5. 1. 3 – Monitoramento hidrogeológico.....	34
3. 2 -Modelagem dos dados	36
3. 2. 1 - Análise geoestatística – variografia e krigagem.	36
3.2. 2 - Modelos de predição da recarga subterrânea	38

3. 2. 3 - Definição do modelo	39
3. 3 Análise Integrada dos dados	40
4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4. 1 - Análise exploratória dos dados.....	42
4.1.1 -Medidas de posição.....	42
4.1.2 - Medidas de dispersão.....	43
4.1.3 -Medidas de forma	45
4. 4 – Análise Integrada dos dados	56
4. 4. 1 Mapeamento das variáveis	56
4. 4. 2 - Padronização dos mapas	61
5. CONCLUSÕES	72
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

Lista de Tabelas

Tabela 1: Medidas de posição calculadas para as variáveis em estudo.....	44
Tabela 2: Medidas de dispersão calculadas para as variáveis em estudo.....	44
Tabela 3. Medidas de forma calculadas para as variáveis em estudo.....	45
Tabela 4. Parâmetros de ajuste dos variogramas.....	46
Tabela 5. Best subset para escolhas do melhor conjunto de variáveis.	48
Tabela 6. Parâmetros do modelo de regressão ajustado para o variável alvo.	49
Tabela 7. Análise de variância Anova para os resíduos do modelo.	50
Tabela 8. Parâmetros espaciais do variograma.....	54

Lista de Figuras

Figura 1. Mapa representativo do Sistema Aquífero Guarani.	13
Figura 2. Mapa de localização da Bacia do Ribeirão da Onça.	31
Figura 3. Mapa geológico da área de estudo.	32
Figura 4. Diferentes usos do solo na bacia (A= Uso para agropecuária, B= Resquício de Cerrado e ao fundo cultivo de citros, C= Eucalipto novo, D) Cana nova, E) Eucalipto adulto, F= Pastagem).	33
Figura 5. Mapa de ocupação do solo da Bacia do Ribeirão da Onça, ano de 2011.	34
Figura 6. Localização dos poços e instrumentos na Bacia do Ribeirão da Onça, Brotas/SP.	35
Figura 7. Fluxograma conceitual para definição de modelos de predição espacial.	39
Figura 8. Variograma ajustado para Resistência média do solo à penetração.	38
Figura 9. Variograma ajustado para Resistência máxima do solo, à penetração.	46
Figura 10. Mapa de Resistência média do solo à penetração.	46
Figura 11. Mapa de Resistência máxima do solo à penetração.	46
Figura 12. Gráfico de normalidade entre os dados observados e preditos.	50
Figura 13. Gráfico de dispersão de resíduos do modelo.	51
Figura 14. Histograma de distribuição dos resíduos.	51
Figura 15. Gráfico de distribuição dos resíduos.	53
Figura 16. Mapa de resíduos do modelo.	55
Figura 17. Mapa de Interpolação de areia (%) na bacia do Ribeirão da Onça.	56
Figura 18. Mapa de Interpolação de Areia Fina (%) na bacia do Ribeirão da Onça.	57
Figura 19. Mapa de Interpolação de Areia Muito Fina (%) na bacia do Ribeirão da Onça.	58
Figura 20. Mapa de Interpolação da resistência média do solo à penetração na bacia do Ribeirão da Onça.	59
Figura 21. Mapa de Interpolação da distância de drenagem em relação aos poços de monitoramento na Bacia do Ribeirão da Onça.	60
Figura 22. Mapa de Interpolação do coeficiente de cultura baseado nos tipos de uso do solo da bacia do Ribeirão da Onça.	61
Figura 23. Mapa de Fuzzificação para a variável areia.	62
Figura 24. Mapa de Fuzzificação para Areia Fina.	63
Figura 25. Mapa de fuzzificação para areia muito fina.	64
Figura 26. Mapa de fuzzificação para distância de drenagem.	65
Figura 27. Mapa de fuzzificação para coeficiente de cultura (KC).	66
Figura 28. Mapa de fuzzificação para resistência média do solo à compactação.	67
Figura 29. Mapa síntese do valor de influência das variáveis em conjunto.	68
Figura 30. Mapa de classes de influência.	69

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 BROTAS/SP-BRAZIL

Author: Claudiane Otilia Paes

Adviser: Rodrigo Lilla Manzione

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 da

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. Para entender como diversas variáveis interagem e definem um processo, é necessário buscar métodos que simplifiquem as análises, tornando assim mais fácil sua compreensão. Análises estatísticas podem fornecer o suporte para definir e simplificar um modelo de predição, enquanto técnicas de geoprocessamento, baseada no hibridismo de mapas, permitem entender essas variáveis de maneira integrada dentro do escopo espacial.

Segundo Oliver (2010), à medida que os problemas práticos e científicos ficam mais complexos, técnicas avançadas são necessárias para que casos específicos sejam resolvidos. Dados em área total são cada vez mais disponíveis, oriundos de sensores remotos ou levantamentos digitais. Essas informações podem ser de grande valor na predição espacial de variáveis difíceis e/ou de alto custo de medição, além de melhorar as estimativas, reduzindo a variância do modelo de continuidade espacial. No caso de dados de poços de monitoramento de níveis freáticos, as informações são escassas e muitas vezes essenciais para o sucesso de sistemas agrícolas instalados sobre reservas de água subterrânea.

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 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Disponibilidade hídrica no mundo

A água doce trata-se do principal recurso para a manutenção e desenvolvimento de toda espécie de vida no planeta Terra. Estando ela presente em basicamente todos os processos no meio natural, como no transporte de nutriente e sedimentos e processos químicos, físicos e biológicos, que atuam na manutenção do equilíbrio no planeta e no desenvolvimento dos seres vivos, sendo assim, um elemento regulador e indispensável ao sistema natural global.

O Planeta Terra, de acordo com Beyruth (2006), tem em sua composição 71% de água, ou seja, água em grande quantidade. Entretanto, esse recurso não está uniformemente distribuído no globo, observam-se, regiões do globo com grande abundância hídrica e regiões com altas taxas de escassez.

Essa distribuição está relacionada com os diversos ecossistemas terrestres. Dependendo dos ecossistemas que compõem o território de uma região, pode-se encontrar maiores ou menores quantidades de água disponível. Assim, países como o Japão, com 2,5 % da população mundial, possui apenas 1 % da água disponível no planeta. A China, com 25 % da população mundial, possui apenas 10 % da água disponível. O Brasil, com 2,8 % da população mundial, abriga 13,8 % das reservas mundiais de água doce (MMA, 2004).

Deve-se ressaltar ainda que, nem toda água presente no planeta, está disponível para o consumo, a maior parte da água, cerca de 97,24 % (BEYRUTH, 2006), está contida nos mares, sendo imprópria para o consumo e, o que resta de água

doce, é ainda subdividida em diversas alocações, como as geleiras, que concentram a maior parte da reserva hídrica doce.

Silva (2007) estimou que cerca de 30% da água doce do planeta são subterrâneas, 69% estão nas geleiras e calotas polares e apenas 1%, forma os rios, lagos e represas. Estes números demonstram a grandeza e necessidade de gerenciamento deste recurso. Ressalta-se assim por esses dados, a importância da água subterrânea.

Além disso, os recursos hídricos vêm sofrendo desde a Revolução Industrial, grande pressão e exaustão, em relação ao seu uso. O crescente desenvolvimento da humanidade, suas tecnologias e processos de produção, além de utilizar uma grande quantidade desse recurso, ainda acarretaram na poluição e degradação dos rios, mares, lagos, aquíferos e oceanos, diminuindo ainda mais a oferta de água própria para o consumo. Segundo Jacobi (2006), o Relatório Anual da Organização das Nações Unidas, faz terríveis projeções para o futuro da humanidade. A ONU prevê que em 2050, mais de 45% da população mundial não terá o mínimo de água para necessidades básicas. Atualmente, estatísticas revelam que, aproximadamente 1,1 bilhão de pessoas, já não tem acesso à água doce própria para consumo e, ainda, em pouco menos de 40 anos esse número pode subir para 10 bilhões de pessoas.

O ciclo hidrológico é responsável pela contínua circulação e renovação de água no nosso planeta. O fato de a água estar dentro de um ciclo, fez pensar por muito tempo que ela seria inesgotável, quando na verdade, a quantidade de água no mundo é sempre a mesma. Quando poluída a água torna-se inútil à manutenção da vida. O ciclo da água é sensível à alterações e isso modifica dinâmicas locais e gera uma reação em cadeia, afetando toda a biota ao entorno.

Para Mendonça (2009), uma das principais causas da poluição dos recursos hídricos nas últimas décadas deve-se ao crescimento exagerado da população. A partir da década de 1950, com a crescente industrialização houve a expansão rápida dos centros urbanos sem planejamento adequado, áreas de fragilidade ambiental foram ocupadas, para atender ao desenvolvimento urbano, exercendo forte pressão sobre os recursos hídricos.

2.2 -Águas subterrâneas

O crescimento rápido da população exigiu o aumento da produção de alimentos em larga escala, provocando, a abertura de novas áreas agrícolas, modificando assim a cobertura vegetal nativa. Essa mudança influi diretamente no ciclo

natural das águas, causando intensa degradação dos rios, mares e lagos em todo o planeta. Segundo Tucci (2005), os mananciais superficiais estão extremamente comprometidos pela ação antrópica, e neste contexto, a água subterrânea surgiu como uma importante alternativa para amenizar a crise dos recursos hídricos e garantir o abastecimento para os mais diversos usos humanos.

Para a Secretaria do Meio Ambiente (2011), águas subterrâneas são as águas que, existem abaixo da superfície do terreno e que circulam em espaços vazios, como os poros, preenchendo-os totalmente. A porção do subsolo onde a água subterrânea ocorre é denominada de zona saturada, que constitui os aquíferos, configurando uma importante reserva hídrica. De acordo com Barros (2008), a importância das águas subterrâneas aumenta, por estarem de certa forma ainda protegidas, em sua maior parte, das contaminações antrópicas,

De acordo com Alley et al. (2002), mais de um 1,5 milhões de pessoas no mundo dependem desse tipo de recurso hídrico. Por muito tempo considerou-se que, as águas subterrâneas eram recursos protegidos da poluição causada pelo Homem e que o solo e as rochas atuavam como um filtro, mas estudos mostram que toda alteração causada na superfície, mantém um relação direta de resposta com a sub superfície.

Embora, essas águas estejam fora de visão para as pessoas e, por este motivo, sejam muitas vezes esquecidas, elas são muito importantes no contexto do ciclo hidrológico, na dinâmica natural de uma bacia hidrográfica, e para o abastecimento dos rios na época das secas e como reserva para o consumo humano, sendo ainda, responsável por determinar algumas propriedades do solo, como umidade, tendo assim influência na produção de alimentos e bem estar da população. Silva (2007, p.15) destacou os principais benefícios na exploração das águas subterrâneas.

Custo de construção de poços geralmente menor que o custo das obras de captação de água superficial, tais como;represas; diques e estações de tratamento. Na maioria das vezes, sua qualidade é adequada ao consumo humano, sem a necessidade de tratamento (salvo em casos de contaminação natural e/ou artificial). É uma alternativa de abastecimento muito conveniente no caso de pequenas e médias populações urbanas ou em comunidades rurais.

Para Alley et al (2002), o uso indevido das águas subterrâneas, pode ser uma ameaça maior que o acúmulo de sais no solo, pois o fato de estarem confinadas em um sistema interligado, gera maior fragilidade à contaminação, uma vez que, uma contaminação local, em uma área de recarga, vai percorrer todo o fluxo até as

zonas de descarga, assim toda água confinada neste caminho vai sofrer alterações negativas.

A grande quantidade de áreas irrigadas e, também drenagem de outras, áreas alteraram os padrões naturais de circulação subterrânea, a contaminação agrícola das águas de percolação resulta em problemas ecológicos e de saúde pública documentados em todo o mundo (BÖHLKE, 2002). Portanto, há grande necessidade em desenvolver projetos e políticas públicas, que visem o planejamento e gestão efetiva das águas subterrâneas, para assim garantir-se o equilíbrio dinâmico de todo o sistema

2.2. 1 -Sistemas Aquíferos

Um aquífero, em geral, trata-se de uma unidade geológica, que possui em sua composição rochas permeáveis o bastante, para que entre seus poros, acumule-se água, formando um fluxo contínuo. As rochas retêm a água das chuvas, através do processo de infiltração, e transmitir essa água, devido ao diferencial hidrostático, para que essa água alimente os mananciais superficiais, sendo assim um rico manancial subterrâneo. Os aquíferos são importantes reservas hídricas, localizadas no subsolo, de acordo com Iritani e Ezaki (2008, p. 15)

Aquífero é um reservatório subterrâneo de água, caracterizado por camadas ou formações geológicas suficientemente permeáveis, capazes de armazenar e transmitir água em quantidades que possam ser aproveitadas como fonte de abastecimento para diferentes usos. São recarregados por água da chuva infiltrada e depende fortemente das médias pluviométricas de cada região ascendendo em períodos chuvosos e descendo em épocas de estiagem.

Para Cabral et al.(2003), um aquífero, vai possuir duas importantes funções; de armazenamento, que depende da sua porosidade e do volume da camada aquífera; e de capacidade de transmitir água, que vai depender do poder de condutividade hidráulica de sua estrutura geológica, entre as áreas de recarga e descarga.

De acordo com Soldera e Manzione (2013, p. 17), um aquífero pode ser;

Classificado em relação à porosidade da rocha que armazena a água, podendo ser granular, fissural e cárstico. Podem ainda ser agrupados por suas características hidráulicas, em livres ou confinados. Aquíferos livres, também chamados de freáticos, estão mais próximos à superfície e ficam submetidos à pressão atmosférica. A água que infiltra atravessa a zona não saturada e abastece o aquífero. Já os aquíferos confinados estão em uma profundidade maior e intercalados por camadas impermeáveis, estão submetidos a uma pressão maior que a da atmosfera, para seu abastecimento a água deve atravessar a camada menos permeável, em um processo lento, ou penetrar na área que este se encontra livre. Há ainda o chamado aquífero suspenso, é quando a água encontra alguma forma de barreira na zona não saturada e fica armazenada por algum tempo.

Mesmo sendo uma reserva hídrica de ótima qualidade e de expressiva quantidade, deve-se salientar que, nem toda água confinada nos aquíferos estão disponíveis para exploração, é necessário estudar as dinâmicas dos mananciais subterrâneos, para que, se quantifique a capacidade que cada aquífero em relação a sua exploração e que essa seja feita de forma segura, evitando exaustão e/ou contaminação desse recurso. De acordo com Foster et al. (2002), aquíferos livres, como é o caso da área de afloramento do SAG, estão mais próximos da superfície, tornando-os mais vulneráveis a contaminações antrópica.

De acordo com a ANA (2007), o uso dos aquíferos, são ainda, expressivos, nos setores turísticos, como as águas termais, e na indústria da água engarrafada. A agricultura é das principais responsáveis pela contaminação dos aquíferos, principalmente após a grande revolução verde agrícola, que propôs a grande maximização das produções, e investiu pesadamente em corretivos, defensivos, fertilizantes, e demais insumos. Segundo Böhlke (2002), “Em muitas áreas, os principais elementos químicos em solução nas águas de percolação que “alimentam” os aquíferos não confinados (livres ou freáticos) estão relacionados direta ou indiretamente com as práticas agrícolas”.

Para que ocorra o uso sustentável das reservas aquíferas, é importante identificar as suas áreas de recarga, pois segundo Iritani e Ezaki (2008), as áreas de recarga são as zonas aflorantes do aquífero, onde a água que provem da chuva, infiltra pela superfície alcançando o manancial subterrâneo, sendo assim, são as áreas de maior fragilidade dos aquíferos. Portanto, conservar essas áreas é essencial para garantir que quantidade de água antes armazenada seja renovada, para que o manancial subterrâneo não diminua seu nível freático e, também para que a água que chega ao aquífero não esteja contaminada evitando sua degradação.

De acordo com a ANA (2009), a potencialidade, e distribuição deste recurso no Brasil, não ocorre de forma homogênea, ocorrendo em abundância em algumas regiões e em grande escassez em outras. Quando se trata de aquíferos no Brasil, salienta-se a relevância do Sistema Aquífero Guarani.

2. 2. 2- Sistema Aquífero Guarani

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) é uma grande unidade hidrogeológica, situada na América do Sul (Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai),

segundo Borghetti et al. (2004), o SAG possui 1.195.500 km, e sua maior parte (839.800 km, ou seja 70%), está em território brasileiro, sendo assim um aquífero transfronteiriço.

A importância do SAG não está somente vinculada ao seu tamanho, extensão e capacidade de armazenamento de água, mas também ao fato que, ele localiza-se em uma região de grande demanda de recursos hídricos, sendo assim uma solução para possíveis problemas de abastecimento nessa região.

Cunha (2003) expõe que no território Brasileiro, o Sistema Aquífero Guarani vai abranger duas grandes zonas climáticas, sendo a Tropical (Região Centro-Oeste e Sudeste, com os tipos climáticos Quente e úmido e o Mesotérmico Brando e Superúmido), e a região Temperada (Região Sul do Brasil, onde predomina o clima Temperado úmido).

O Sistema Aquífero Guarani (Figura 1) teve sua formação há aproximadamente 130 milhões de anos, com estrutura, em grande parte, composta por arenitos bem homogêneos e com boa quantidade de poros, o que contribui na capacidade de armazenar água e no seu fluxo interno, segundo Conicelli (2007, p. 7), sua estrutura é basicamente:

Um pacote de rochas arenosas [Formação Botucatu e Pirambóia] sotapostas (depositadas na Bacia Geológica do Paraná entre 245-144 milhões de anos atrás) quase que em toda a sua extensão por rochas basálticas da Formação Serra Geral [...], tem uma espessura que varia entre 200 e 800 m, estando situadas em profundidades que podem atingir até 1800 metros.

A formação geológica do aquífero Guarani é composta por; arenitos mesozóicos das formações Botucatu, Pirambóia e Rosário do Sul, que costumam apresentar espessura média de 250 m, além de estarem recobertos por uma camada espessa de basalto, que em alguns locais chega a 1.500 m. Em termos hidrogeológicos, de acordo com Araújo et al (1999), 90% do SAG encontram-se confinados, ladeados por faixas alongadas aflorantes, que constituem potenciais zonas de recarga direta do aquífero.

Segundo Iritani e Ezaki (2008), a porção aflorante do Aquífero Guarani comporta-se como aquífero livre e é pequena, comparada a sua área total. Desta forma, a água que infiltra no solo atravessa a zona não saturada e recarrega diretamente o aquífero, assim todas as substâncias presentes em superfície podem atingir e comprometer a água do sistema aquífero. E tanto as zonas de recarga, como as de descarga estão associadas às áreas de afloramento, portanto, medidas de proteção a essas áreas são de

suma importância para a garantia da qualidade da água e da preservação destas reservas hídricas. As águas do SAG são de maneira geral boa para consumo, por possuir baixo nível de mineração. Para o Brasil, o Sistema Aquífero Guarani, representa uma fonte estratégica, para garantir futuramente o abastecimento público e manutenção de diversas atividades, uma vez que a demanda por recursos hídricos só aumenta.

Estudos a respeito desta reserva são necessários para a compreensão dos seus mecanismos de recarga e sua disponibilidade hídrica pois, apesar de seu tamanho exige cautela para não provocar a exaustão do aquífero. Por se tratar de uma grande área, situada em quatro países diferentes, as formas de usos da água e manejo da superfície são diversas, desde atividades industriais, consumo urbanos e a maior parte empregada nas atividades agrícolas, neste sentido, trabalhos que busquem modelos acurados, para representar fenômenos ligados às recargas, são importantes na busca de um planejamento integrado e adequado das águas.

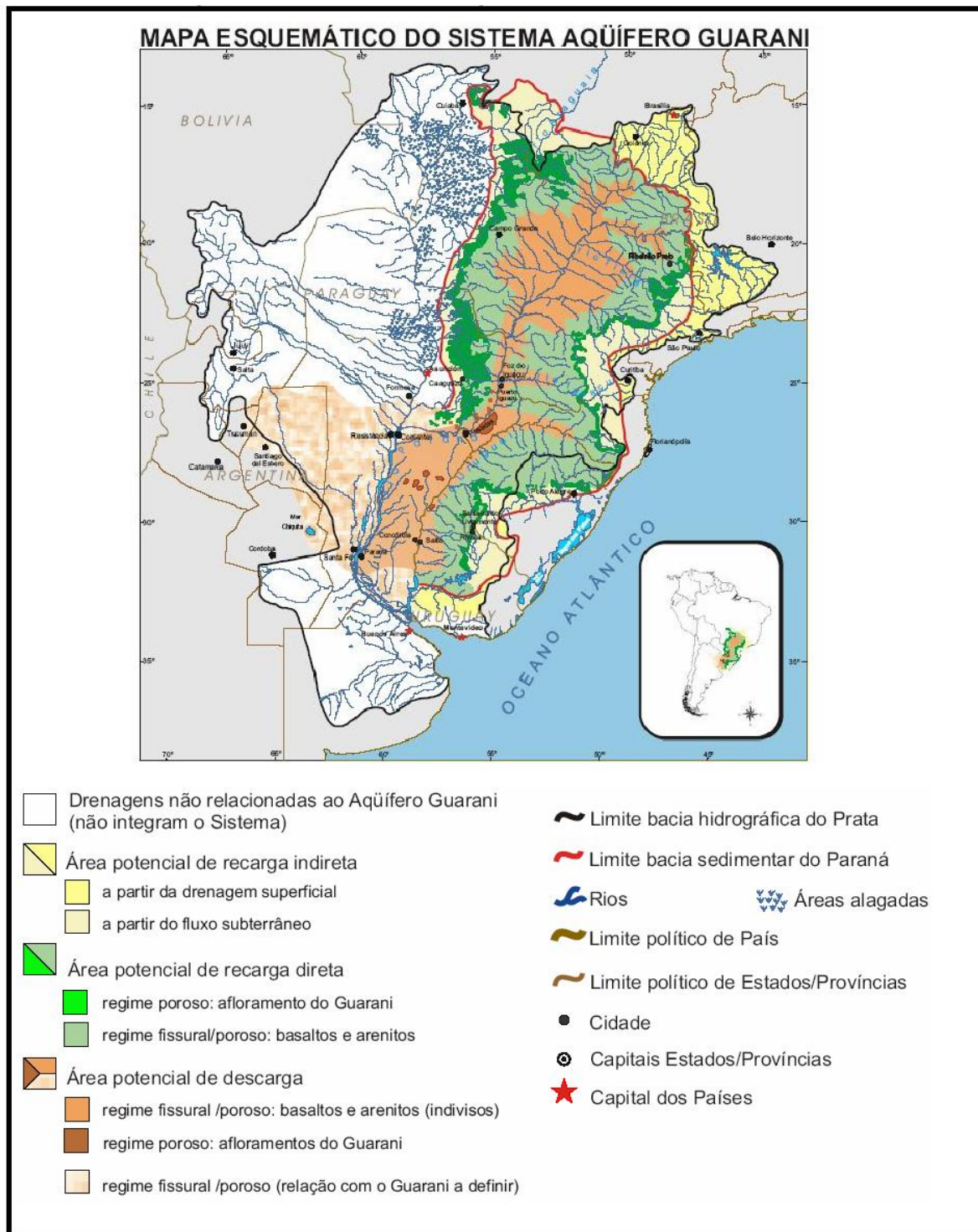


Figura 1. Mapa representativo do Sistema Aquífero Guarani.

Fonte: http://www.sg-guarani.org/index/site/sistema_acuifero, apud Gomes (2006).

Pelo fato do SAG possuir grande extensão, um estudo com maior grau de precisão de suas características, implicaria muito tempo e recursos, ao contrário de pequenas bacias hidrográficas, por serem mais homogêneas em suas características, são representativas no melhor entendimento dos processos físicos, químicos e biológicos que determinam a dinâmica do ciclo hidrológico da água. Definir um modelo estocástico para uma bacia representativa da área de afloramento do SAG auxilia na previsão as respostas do aquífero em relação às ações antrópicas.

2. 2. 3 - A importância das áreas de recarga

De acordo com Paralta et al. (2007), a área de recarga de um aquífero pode ser caracterizada como a zona responsável por manter o nível freático e por renovar as águas subterrâneas. Ela ocorre pelo processo de infiltração da água no solo, estando condicionada à diversas variáveis aleatórias, que tem ação direta ou indireta na recarga, como, tipo de solo, física do solo (estrutura e agregação, textura, densidade e porosidade), mecânica do solo (compactação e permeabilidade), uso do solo, formação geológica e nível freático.

A água que entra na zona saturada (aquífero), preferencialmente a partir da percolação vertical proveniente da zona vadosa, poderá também ter origem no escoamento lateral a partir das fronteiras do sistema. No caso dessas áreas serem perturbadas em seu equilíbrio natural, todo o aquífero responde à essa interferência, diminuindo quantidade e mesmo a qualidade das águas.

As análises e avaliações corretas, sobre as recargas de um aquífero são dados importantes na quantificação da disponibilidade exploratória da água subterrânea, uma vez que os processos de recarga ocorrem conforme seu tempo natural, que pode não acompanhar a extração da água. De acordo com Alley et al. (2002), em muitas regiões (principalmente regiões áridas), grande parte da água subterrânea explorada é fruto de uma recarga de outros tempos geológicos, muito provavelmente da última era do gelo.

Sendo assim, a recarga torna-se o processo mais importante para a manutenção de um aquífero. Desta forma o manejo correto do solo é fundamental na gestão do aquífero.

2.3 - Relação entre, o solo e a dinâmica hídrica na área de recarga

Diversos fenômenos e características físicas possuem relação no espaço e no tempo, como no caso do sistema hidrológico em relação à estrutura dos solos, onde há uma conexão direta entre seus atributos. Mudanças da disponibilidade de recursos hídricos apresentam grandes impactos no meio ambiente.

Segundo Soares et al. (2008), o ciclo hidrológico representa a dinâmica das águas no meio natural, sendo essa entendida como, uma série de armazenagens e transferências de água conectadas em um conjunto de fases que representam os caminhos pelos quais a água passa durante o processo. O tamanho da bacia, as características físicas do solo e relevo, a vegetação e o uso do solo local irão influenciar nesse processo determinando, por período vai ser mais longo ou mais curto.

Segundo Healy (2010), na maior parte das regiões, a influência da vegetação é sazonal, em períodos de senescência, por exemplo, a presença de plantas pode realmente promover e intensificar o processo de recarga. A diminuição de raízes pode expor as cavidades que atuam como canais de fluxo preferenciais, aumentando infiltração e conseqüentemente, a taxa de recarga. Desta forma, o estudo e mapeamento das propriedades físicas do solo são cruciais na determinação dos processos de recarga.

2.3.1 -Propriedades físicas do solo

O conhecimento das propriedades físicas do solo é de grande relevância, para o conhecimento de sua dinâmica hídrica. Babalola (1978) salientou que alta variabilidade de propriedades físicas do solo, tais como o conteúdo de areia, argila e silte, bem como da densidade global, resultam em alta variabilidade nas características de retenção de água pelo solo.

A estrutura de um solo é determinada pela agregação das partículas primárias, definido por Oliveira et. al (1999) como, resultado da agregação de suas partículas primárias (areia, silte e argila), juntamente com matéria orgânica, que agrupam-se formando agregados de diferentes tamanhos e formas, e comportam-se individualmente em unidades estruturais compostas, separadas entre si pelas superfícies de fraqueza, a esse arranjo do material sólido inorgânico e orgânico do solo, composto pelos agregados dá-se segundo Perusi (2001), o nome de estrutura do solo.

A textura do solo, comumente, apresenta características iguais ao material de origem (rocha). Sendo analisada de acordo com o peso das três frações

minerais do solo; areia, silte e argila. Grande parte dos processos importantes de reações físicas e químicas que ocorrem no solo estão ligados, a textura, devido “ao fato de que, a textura determina a quantidade de superfície na qual as reações vão ocorrer” (LEPSCH, 2002) . Para Prado (2003), “a textura, que constituiu a fase mineral sólida do solo, mede em porcentagem as proporções de argila, silte e areia e tem sido utilizada como sinônimo de granulometria do solo”.

Em relação à quantidade de água que um solo é capaz de reter mais ou menos água em seus microporos, de acordo Azevedo e Dalmolin (2006), solos de textura mais argilosa, possuem maior proporção de microporos, sendo mais importante na retenção, que na transmissão da água, já, em solos com grande densidade, onde não há altos valores de compactação há a tendência de mais macroporos, que retém mais água.

Segundo Andrade (2001), a densidade do solo encerra uma complexidade de fatores inerente a cada local de amostragem, o que leva às dificuldades da sua avaliação. Essa complexidade aliada a variabilidade solo, torna mais difícil sua quantificação, que revele mais proximidade com a realidade.

De acordo com Perusi e Carvalho (2002), a densidade do solo é o volume natural deste, incluindo, os espaços ocupados pelo ar e pela água, sendo variável e dependente da estrutura e da compactação. O excessivo tráfego de máquinas agrícolas e uso repetido de implementos de cultivo causam compactação e adensamento do solo, o que, em último termo, traduz-se em altos valores da densidade do solo.

Também, em estudos realizados por Souza et al. 2004), constatou-se que a movimentação de implementos agrícolas durante as diversas etapas da produção aumenta a densidade do solo e, conseqüentemente, produz redução da porosidade total que, por sua vez, exercerá influência na capacidade de retenção de água, aeração, drenagem e condutividade hidráulica, afetando assim, a produtividade das culturas.

A preocupação com a variabilidade do solo vem preocupando pesquisadores desde o início do século XX, segundo Souza Filho et al. (2001), em razão dos atributos do solo e, em especial, o fato de que, a densidade não é homogênea e apresenta dependência espacial, gerando grande variabilidade, que causa problemas em experimentação em campo. Em razão disso, levar em consideração essa variabilidade é essencial para o melhor entendimento das relações do solo com a recarga.

Segundo Shuler (2002), o tempo de residência da água nos diversos compartimentos da hidrosfera influencia entre outros, a disponibilidade hídrica, a

ocorrência de inundações e a dinâmica de elementos, nutrientes e poluentes. A importância dessas inter-relações é responsável pelo crescente interesse em estudos hidrológicos e, por consequência, nos processos através dos quais a água chega aos rios. A modelagem matemática, entra nesse contexto como ferramenta utilizada no conhecimento mais aprofundado dos fenômenos físicos envolvidos e previsão de cenários.

Devido à complexidade desses mecanismos hidrológicos no solo, associada à influência da cobertura vegetal, a distribuição espacial da precipitação e evapotranspiração, a utilização de modelos matemáticos é praticamente imprescindível para uma adequada interpretação dos fenômenos envolvidos.

A porosidade do solo pode ser definida como o volume de vazios, ou seja, o espaço do solo não ocupado por componentes sólidos. Kiehl (1979), fez uma correlação entre porosidade e densidade: “o volume e a natureza da porosidade de um solo estão correlacionados com outras propriedades, como densidade aparente, devido ao rearranjo das partículas”, influenciando direta e indiretamente nos mecanismos de recarga e, como as partículas variam em tamanho, forma, regularidade e tendência de expansão pela água, os poros vão diferenciar-se quanto a forma, comprimento e largura.

2.4 -Propriedades físicas e mecânicas do solo, e sua influência do movimento da água e na recarga do aquífero

De acordo com Sales et al (1999), "a capacidade de infiltração é uma propriedade do solo que representa a intensidade máxima que o solo, em dada condição e tempo, pode absorver a água da chuva ou da irrigação". Isso determina a quantidade de água infiltrada no solo que, por sua vez, é determinante no potencial de recarga. Essa capacidade vai depender de inúmeras propriedades físicas e mecânicas do solo, como textura (granulometria), porosidade, permeabilidade, densidade e compactação.

A textura do solo está intimamente ligada a porosidade e de acordo com a Embrapa (2013), um termo empregado para designar a proporção relativa das frações argila, silte ou areia no solo.

Estes diferenciam-se entre si pelo tamanho de suas partículas (granulometria), atuando assim na retenção da água nos macro e micro poros , que vão alcançar a zona vadosa e alimentar os aquíferos. Mesquita e Moraes (2004), ressaltaram que, de fato, pouco se pode dizer a respeito do comportamento de um solo que tenha 50% de argila, por exemplo, exceto que ele é argiloso. Solos com classes texturais diferentes

podem evidenciar uma distribuição contrastante na sua porosidade e, por conseqüência, na condutividade hidráulica.

Para Reichert et al (2004) a textura do solo afeta o salpico de partículas provocado pelo impacto das gotas de chuva, contribuindo para uma redução da porosidade da camada superficial do solo, com isso gera um selamento superficial que de acordo com Morin e Van Winkel (1996), reduzem a redução da taxa de infiltração, afetando as águas subterrâneas, Bertol et al., (2001) salientaram que solos intensamente cultivados o surgimento de camadas compactadas determinam a diminuição do volume de poros ocupado pelo ar e o aumento na retenção de água. Em decorrência disto, foi observado pelos autores diminuição da taxa de infiltração de água no solo.

Uma das principais causas da degradação do solo é a compactação, resultado do processo de aumento da densidade e resistência à penetração. Segundo Cunha et al. (2002), a compactação pode ser definida como sendo a ação mecânica por meio da qual se impõe ao solo uma redução em seu índice de vazios, que é a relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos. Segundo Letey (1985), a resistência do solo à penetração é uma das propriedades físicas do solo diretamente relacionada com o crescimento das plantas e modificada pelos sistemas de preparo do solo.

Para Lima et al. (2006), o processo de compressão do solo refere-se à compactação (expulsão do ar) , à consolidação (expulsão da água) e o entendimento deste processo torna-se essencial para avaliar a estrutura física de um solo. Desta forma a resistência do solo à penetração representa um atributo relevante para a definição útil do estado mecânico do solo para definição o seu uso, manejo e planejamento de sistemas de mecanização agrícola.

Para Souza et al. (2004), estudar os atributos físicos do solo e avaliar a resistência do solo à penetração constitui em uma importante ferramenta a ser utilizada para orientar o manejo e o controle da qualidade física do solo. Segundo Cunha et al. (2002), a resistência mecânica do solo à penetração tem sido usada, ao longo de muitos anos, com várias aplicações em diversos campos da ciência, a fim de dimensionar o nível de degradação causada aos solos.

Segundo Lima (2009), a compactação do solo ocorre de maneira muito freqüente, em ambientes que utilizam máquinas e implementos ou em áreas onde o pisoteio de animais é intenso, constituindo um dos mais sérios fatores de restrição ao desenvolvimento das plantas. O que se observa com a modernização da agricultura é o

aumento dessa compactação devido ao uso de máquinas pesadas no processo de plantio (LIMA et al., 2006; SOUZA et al., 2006). Segundo Machado (2003), os problemas que a compactação do solo pode causar são: o aumento da resistência mecânica do solo que compromete o crescimento em profundidade das raízes das plantas; a redução de ar no solo (raízes podem morrer por asfixia) e da disponibilidade de água e nutrientes para as plantas, e a erosão hídrica que provoca um acúmulo de água na superfície do solo gerando escoamento superficial, que por sua vez se deposita-se em reservatórios de água doce. A resistência do solo a penetração da água, vai ter influência direta no desenvolvimento das plantas.

Soares Filho (1992) mencionou que a compactação é um dos mais sérios danos causados ao solo devido à exploração agrícola. Desta forma, a capacidade resistência do solo à penetração tem sido comumente empregada como indicador da compactação. Para Tavares Filho et al (2001), as modificações estruturais causadas no solo pelos diferentes sistemas de manejo podem resultar em maior ou menor compactação, que poderá interferir na densidade do solo, na porosidade, na infiltração de água no solo e no desenvolvimento radicular das culturas.

As medidas de compactação do solo, pela resistência á penetração podem ser obtidas através de aparelhos conhecidos por penetrômetros ou penetrógrafos. De acordo com Collares et al. (2004), os penetrômetros portáteis, de acionamento manual, têm sido usados em estudos comparativos de sistemas de manejo do solo, medindo a resistência à penetração do solo. Segundo Silva et al. (2004), a preferência em utilizar penetrógrafos para medir o estado de compactação está na praticidade e rapidez na obtenção dos resultados. A compactação do solo está diretamente ligada e, inversamente proporcional a sua permeabilidade.

Por permeabilidade entende-se a capacidade do solo em transmitir fluidos, no caso à água (REICHARDT e TIMM, 2004; LIBARDI, 2005). Segundo Brandão et al. (2002), a infiltração é processo pelo qual a água atravessa a superfície do solo, sendo determinante no balanço da água na zona radicular é de fundamental importância para um eficiente manejo do solo e da água. Para Soares et al. (2008), os processos de infiltração, retenção e percolação são responsáveis pela manutenção da bacia hidrográfica como um reservatório dinâmico do sistema hidrológico, processo esse que vai permitir o armazenamento de água nos lençóis freáticos. De acordo Dunne e Leopold (1978), o processo de infiltração é o resultado de relações de interdependência na entrada de água na

superfície do solo, na armazenagem e na transmissão de umidade do interior do solo. Diversos fatores como; características estruturais do solo, tipo de cobertura, tipo de preparo do solo e manejo adequado, vão interferir nesses processos, a permeabilidade, aliada a compactação do solo vai ser uma característica determinante para isso.

Segundo Alonso (2007), a permeabilidade pode ser definida como, a maior ou menor facilidade que os solos oferecem à passagem de água. O estudo da permeabilidade permite quantificar a partir de diversas características do solo, em especial pela densidade, a macro e microporosidade, a intensidade do movimento da água no solo.

O nível de fluidez também vai depender do tipo de solo existente na bacia, os solos argilosos, por exemplo, apresentam porosidade total maior que os solos arenosos, pois tem maior número de pequenos poros que, contribuem para uma alta capacidade de retenção de água e baixa permeabilidade (GROHMANN, 1960). De acordo com Soldera (2011), a permeabilidade não dependerá somente da quantidade de vazios do solo, mas também da disposição dos grãos, assim em solos compactados mais secos, a disposição das partículas vai permitir mais movimento da água do que se estivesse mais úmido, isso é chamado de estrutura dispersa, e depende muito da resistência do solo à penetração. À medida que essa resistência aumenta, a permeabilidade dos solos é alterada, e a infiltração e conseqüentemente, a recarga das águas subterrâneas fica comprometida.

Segundo Healy (2010), áreas impermeáveis, ou seja, com alto grau de compactação, podem inibir os processos de recarga de um aquífero.

Os solos agrícolas constituem um complexo sistema, que aliado ao ciclo hidrológico retém e transmite água, ar, nutriente e calor às sementes e plantas, desta forma é necessário um ambiente físico favorável ao crescimento radicular, para elevar ao máximo a produção agrícola nesses solos, entretanto para Klute em 1982 (apud TORMENA et al., 2002), os sistemas de preparo, dependendo da estrutura do solo, do clima, da cultura e de seu manejo, podem promover a degradação da qualidade física do solo, com restrições ao crescimento radicular. Uma vez que os sistemas de preparo do solo modificam suas propriedades, elas acabam tornando-se indicativos da qualidade dos solos.

2. 5 -O uso de modelos de predição espacial dos atributos do solo

Um modelo é uma abstração da realidade, segundo Healy (2010), uma tentativa de representação de uma ou todas as propriedades de um fenômeno, sistema

ou objeto, que tem com propósito compreender melhor a resposta de processos a partir de observações realizadas ou mesmo deduzir efeitos. Sua construção é uma tentativa de ganho em conhecimento sobre determinado fenômeno. À medida que o conhecimento sobre determinados fenômenos aumenta, a complexidade dos modelos tende a aumentar também.

Um modelo é a representação matemática de processos do mundo real, geralmente expresso na forma de uma equação (ou conjunto delas), que descreve as relações entre diversas variáveis (HENGL, 2009). Um modelo estatístico é capaz de incorporar variações aleatórias, intrínsecas aos processos do mundo real, como em muitos processos biológicos, ou produtos de medidas imprecisas, comuns em processos físicos.

Podem-se distinguir duas aproximações para representar a variação espacial dos solos (HEUVELINK ; WEBSTER, 2001). A primeira vem da intuição, do conhecimento formal, e da sabedoria de onde coletar as informações disponíveis no solo e suas interações com a vegetação, geologia geomorfologia e uso da terra.

Nesses mapeamentos, os processos inferenciais e classificatórios ocorrem simultaneamente, considerando a homogeneidade das propriedades do solo, dentro de cada unidade de mapeamento. Reparte-se o solo em classes discretas, representada por polígonos, a partir de aspectos do terreno observados no próprio campo, ou com auxílio de dados de sensoriamento remoto. Esse tipo de aproximação considera que as propriedades dos solos não possuem variações espaciais, aparecendo como mudanças abruptas que ocorrem a partir de um limite estabelecido, sem zonas intermediárias ou mudanças graduais, não havendo formalismo nem quantificação das variações.

Para que esse tipo de mapeamento ocorra com sucesso, há demanda de grande número de amostragens de solo, seja para construção ou calibrações de mapas e modelos. O segundo tipo de aproximação considera o solo composto por um conjunto de variáveis contínuas, realizando estimativas não só qualitativas como principalmente quantitativas.

No caso de estudos a respeito das propriedades dos solos, devem-se utilizar métodos que considerem a dependência espacial entre as amostras. Para Teixeira et al. (2009), o fato de a grande maioria das propriedades do solo apresentarem dependência espacial, significa que a variável localizada em um determinado local possui uma relação com ela mesma até uma determinada distância. Para Landin (1998), a análise espacial de dados apresenta-se como uma alternativa e/ou como uma complementação da análise clássica de dados, sendo que, este tipo de análise considera as correlações entre as

observações quando se fazem estimativas. De acordo com Mello (2005), o conhecimento das propriedades físicas dos solos, principalmente das relacionadas à distribuição granulométrica, influenciam diretamente o fluxo superficial e o movimento da água no solo, sendo fundamentais para o planejamento ambiental. Conforme salienta Valeriano et al. (1998), a representação de um fenômeno geoambiental da paisagem por meio de polígonos de homogeneidade, muitas vezes é inadequada, como em mapas de solo, por exemplo, não ocorre uma mudança abrupta, com limites definidos entre os valores, essa mudança tende a ser gradual. Burrough et al. (1994) relataram que, a variabilidade dos solos tem sido abordada pela classificação numérica, por métodos de estatística multivariada, classificação contínua (fuzzy), geoestatística, métodos de fractais, morfologia matemática e teoria do caos.

A geoestatística é um tópico especial da estatística aplicada que tratam de problemas referentes às variáveis regionalizadas, aquelas que têm comportamento espacial mostrando características intermediárias entre as variáveis verdadeiramente aleatórias e as totalmente determinísticas (LANDIM, 1998). A geoestatística trata-se de uma ferramenta para subsidiar o tratamento de informações da estrutura dos solos, por permitir a descrição da distribuição espacial dos valores de seus atributos a partir da modelagem da continuidade espacial (GONÇALVES et al., 2009) e ser capaz de analisar tanto a dependência espacial, através de semivariogramas, como interpolar atributos do solo através da krigagem (SOUZA et al., 2006). A teoria fundamental da geoestatística é a esperança de que, na média, as amostras próximas no tempo e espaço sejam mais similares entre si do que as que estiverem distantes (ISAACS ; SRIVASTAVA, 1989).

Essas fontes de informação de solo, ou similares, podem servir para aquisição de outros tipos de dados, que auxiliam no estabelecimento das relações existentes no sistema solo-planta-atmosfera, ou mesmo nos processos de formação ou interpretação dos solos, ou seja, informações sobre clima, vegetação, organismos presentes, litologia, entre outros.

2.6 - Integração de informações no modelo de predição espacial

A busca de um modelo que estabeleça uma relação funcional entre duas ou mais variáveis é denominada de regressão. Com a atual abundância de dados e

disponibilidade de sensores que provem informações em área total, a busca por modelos que considerem diversas variáveis na descrição de um processo é cada vez maior. Recentes estudos demonstram o uso concomitante de técnicas de regressão e krigagem dos resíduos. Esses métodos combinam métodos de regressão linear simples ou múltipla com krigagem simples ou ordinária dos resíduos, justamente para explorar a autocorrelação espacial. A premissa aqui é que a componente determinística da variável do solo é mensurada pelo modelo de regressão, enquanto seus resíduos contêm uma variação espacial dependente dessa componente.

Odeh et al. (1994, 1995) definiram a krigagem dos resíduos da regressão com uma função $f(x)$, usada para descrever a relação entre variáveis independentes e atributos do solo, $S(x) = f(Q, x) + e(x)$, sendo $f(Q, x)$ a função que descreve o comportamento estrutural de S , como função de Q a determinado x , e $e(x)$ a variação espacial residual de $f(Q, x)$ expressa localmente. Na krigagem dos resíduos da regressão, a propriedade do solo S é primeiramente estimada por f em locais não amostrados, seguido pela a krigagem dos resíduos do modelo proposto.

Os modelos de previsão são modelos capazes de estimar a reação de um processo no tempo e no espaço, como a análise de regressão. De acordo com Hengl (2009), um preditor espacial estatístico é um modelo conceitual que explica a relação entre variáveis, podendo prever seus valores, sendo assim um modelo de suposições, ou seja, um conjunto de prévias, ou uma simulação.

Uma vez definido um modelo entre os dados e a dependência espacial, é possível fazer o mapeamento da área estudada.

2. 6. 1- Análise de Regressão

A análise de regressão é uma técnica que permite explorar e inferir a relação de uma variável dependente (que é chamada variável resposta, e geralmente trata-se de uma variável de difícil obtenção) com variáveis independentes (que são chamadas explicatórias ou explanatórias) justamente por buscar inferir valores preditos para variável resposta em questão. A análise de regressão também pode ser utilizada como um método descritivo da análise de dados. Regressão designa também uma equação matemática que descreva a relação entre duas ou mais variáveis.

Um modelo de regressão trata-se da busca de uma correlação entre duas ou mais variáveis, onde uma é explicada pela outra, sendo assim, expressa uma relação entre o observado e o predito.

De acordo com Câmara et al., (2012), no caso de dados espaciais, havendo autocorrelação espacial, o modelo gerado deve incorporar a estrutura espacial, já que a dependência entre as observações afeta a capacidade de explicação do modelo.

Desta forma, só se deve utilizar um modelo de regressão caso a correlação entre as variáveis seja significativa pois, de acordo com Prado et al. (2010), enquanto a correlação mede o grau de relacionamento entre duas variáveis ou mais, a regressão fornece uma equação que descreve o relacionamento matemático entre elas.

Na regressão clássica, de acordo com Bailey e Gatrell (1995), utiliza-se o método dos mínimos quadrados ordinários, que gera um modelo onde o valor resulta na menor soma dos quadrados dos erros. Um modelo de regressão pode ser linear simples (MRLS) que, segundo Silva et al. (2010), descreve uma relação entre uma variável independente (explicativa ou regressora) X e uma variável dependente (resposta) Y, quando há muitas variáveis explanatórias é usado a chamada regressão múltipla.

2. 6. 2 - Regressão Múltipla

A Regressão Múltipla é, de acordo com Formaggio (2007), um dos inúmeros modelos estatísticos explanatórios causais, referentes ao tratamento de séries temporais de dados. Sua base estatística advém da Regressão Linear, que se restringe a duas variáveis e a apenas uma equação funcional do primeiro grau de ajustamento.

De acordo com Landim (2004), não é raro que seja necessário incorporar mais variáveis em uma regressão, para que se obtenha melhor ajuste da variável resposta. Sendo assim, trata-se de um modelo de predição a partir de um conjunto de variáveis explanatórias, que são independentes entre si, para a previsão de uma variável dependente.

Alguns tipos de variável resposta são por vezes dependentes de um grande conjunto de variáveis explanatórias, sendo a regressão múltipla, um bom estimador nesses casos.

Para Formaggio (2007), quanto mais significativo for o peso de uma variável isolada, ou de um conjunto de variáveis explicativas, tanto mais se poderá

afirmar que alguns fatores afetam mais ou afetam menos, o comportamento de uma variável de resposta especificamente procurada.

2.7 - Mapeamento das variáveis pelo método IDW

Quando não é possível utilizar um método mais complexo de interpolação dos dados, pela falta de dependência espacial, como a krigagem, baseada nos conceitos geoestatísticos, pode-se optar por interpoladores comuns como o Inverso da distância.

De acordo com Formaggio (2010) esse tipo de interpolador utiliza um modelo estatístico denominado „inverso das distâncias“, que é baseado na correlação dos dados, com os valores de seus vizinhos, ou seja, vizinhos mais próximos possuem mais influência no peso da interpolação, sendo assim trata-se de se multiplicar os valores das observações, pelo inverso da distância do ponto de referência, que quando elevada a segunda potência torna-se, inverso da distância do quadrado.

De acordo com Costa e Silva (2012), esse método de interpolação global baseia-se no princípio de que quanto mais próximo estiver um ponto do outro, maior deverá ser a correlação entre seus valores.

Entretanto, quando se opera com um conjunto de dados tão distintos (em questão de mensuração de variáveis) é necessário padronizá-los, para que se possa analisá-lo por completo, nesse sentido a lógica fuzzy oferece ferramentas, capazes de gerar essa padronização.

2.8 - Lógica fuzzy

A lógica fuzzy é uma teoria desenvolvida para admitir que existem valores intermediários entre os limites, mínimos e máximo de um conjunto de dados. Os princípios da lógica fuzzy foram desenvolvidos por Zadeh, em 1965, que apresentou uma aproximação entre a precisão da matemática clássica e da imprecisão do mundo real - uma aproximação nascida da busca humana incessante por uma melhor compreensão do processos mentais e cognitivos.

Baseada na teoria dos conjuntos difusos, a lógica fuzzy, difere-se dos sistemas lógicos tradicionais, ao tratar a incerteza entre os dados, de acordo com Gomide et al (1995), nesta lógica, "o raciocínio exato corresponde a um caso limite do raciocínio aproximado, sendo interpretado como um processo de composição de relações nebulosas." De acordo com Lee (1990), a teoria de modelagem fuzzy mostra o

relacionamento entre entradas e saídas, agrupando vários parâmetros ou variáveis de processo e de controle, permitindo a consideração de fenômenos e processos complexos, com maior acurácia e robustez.

As funções fuzzy explicitam o grau de pertinência dos dados em relação ao fenômeno a ser descrito. Geralmente, três tipos de funções de pertinência são consideradas: a sigmoideal, a função linear e a binária (falso e verdadeiro), sendo esta última, a que nos importa neste trabalho.

Diferentemente dos conjuntos clássico que definem apenas falso ou verdadeiro (0 e 1), as função de pertinência fuzzy binária admite que há uma possibilidade parcial de pertinência, definindo entre falso a verdadeiro (0 a 1).

Para Borrough (1989), há duas maneiras de analisar essa função de pertinência; a primeira é análoga, e determinada por análise de agrupamento e taxonomia numérica; e a segunda, mais simples, é baseada no uso de uma função de pertinência a priori.

Para Kuterner e Badenko (1999), a Teoria dos conjuntos fuzzy, trata-se de uma importante ferramenta para interpretação de informações quantitativas, principalmente quando aliada a Sistemas de Informações Geográficas.

De acordo com Gomide et al. (1995) , a grande simplicidade de implementação de sistemas de controle fuzzy, pode reduzir a complexidade de um projeto a um ponto, em que, problemas anteriormente intratáveis passam agora a ser solúveis. Desta forma, essa teoria trata-se de um método matemático que torna possível propagar e caracterizar, as incertezas de um fenômeno mediante aos dados disponíveis. El-Hawary et al. (1998), salientou que, a teoria foi desenvolvida para tratar imprecisões, ambigüidades e incertezas nas informações,

Segundo Meza et al (2005) , esta técnica torna-se adequada quando o problema tratado tem as seguintes características:

A interação com especialistas humanos é exigida; um especialista está disponível para especificar as regras que regem o comportamento do sistema e as representações fuzzy; um modelo matemático para o problema não existe ou é difícil de ser implementado; dados imprecisos e com ruído estão presentes. Portanto entendemos que na lógica fuzzy podemos empregar probabilidades linguísticas, que aproximam o mundo real da exatidão matemática aplicando um conceito de possibilidade.

Quando trabalha-s com modelos, nem sempre utiliza-se variáveis com dados de mesma mensuração e, muitas vezes, isso dificulta uma análise integrada dos dados.

De acordo com Calijuri e Lorentz (2003), os valores de diferentes critérios não são comparáveis entre si, impossibilitando a sua agregação, necessitando assim de uma padronização. Para Deus (2009), a padronização seria um processo de conversão dos valores dos dados originais em níveis de adequabilidade compatíveis.

Uma das funções muito utilizadas da lógica fuzzy é a chamada fuzzificação, onde torna-se possível transformar variáveis de diferentes mensurações, em uma mesma unidade de medida. A matemática fuzzy estabelece uma interface entre os dados descritos simbolicamente (com as palavras) e numericamente (com os algarismos). Um dos procedimentos da lógica fuzzy é a fuzzificação, que trata-se da técnica de “converter os intervalos com valores reais de entrada, em um grau de pertinência num conjunto fuzzy” (WANG, 1997), ou seja, trata-se da transformação de valores em um intervalo (geralmente entre 0-1) levando em consideração a pertinência dos dados.

Para Freitas e Mendes (2010), a fuzzificação é uma classificação na qual os limites entre as classes não são evidentes, definindo uma função de pertinência que varia entre 0 e 1, de maneira que o grau de cada entidade possa ser medido dentro de cada classe.

Sendo assim, na fuzzificação, ainda, de acordo com Gomide et al. (1995):

O valor verdade de uma proposição pode ser um subconjunto fuzzy de qualquer conjunto parcialmente ordenado, ao contrário dos sistemas lógicos binários, onde o valor verdade só pode assumir dois valores: verdadeiro (1) ou falso (0). Nos sistemas lógicos multi-valores, o valor verdade de uma proposição pode ser ou um elemento de um conjunto finito, num intervalo, ou uma álgebra booleana. Na lógica nebulosa, os valores verdade são expressos linguisticamente, (verdade, muito verdade, não verdade, falso, muito falso, ...), onde cada termo linguístico é interpretado como um subconjunto fuzzy do intervalo unitário.

A fuzzificação, segundo Deus (2009), é utilizada para padronização dos dados de acordo com alguma função para um intervalo particular comum, representando uma variável de acordo com seu grau de adequabilidade, sendo que esta medida é representada em uma escala contínua que representa todo o espaço avaliado.

Meza et al. (2005), ressaltaram ainda que, através do emprego da fuzzificação é possível, em muitos casos, representar de forma adequada complexas fronteiras de decisão, ou seja, é possível mapear transições graduais entre estados de decisão.

Oliveira et al. (2005) utilizaram as técnicas da lógica fuzzy para identificar áreas susceptíveis ao escorregamento na região de Campos dos Goytacazes -RJ,

com intuito de padronizar valores de diferentes variáveis, como textura e profundidade do solo, reescalando os dados em 0 menos apto e 255 mais apto, distribuindo sua pertinência dentro do mapa.

Praun Júnior (2007) utilizou técnicas fuzzy, em um processo de análise hierárquica, para definir uma proposta de corredor ecológico para as áreas de recarga direta do Aquífero Guarani em Santa Catarina, a partir de aspectos físicos e legais.

Nascimento (2009) utilizou a lógica fuzzy, como suporte na realização dos procedimentos de análise espacial, visando a geração de um cenário com as áreas aptas para ocupação urbana no perímetro urbano de João Pessoa/PB, a partir de critérios físicos do município, como declividade e substrato rochoso e cada critério foi reescalado para o intervalo numérico de 0 a 1, onde cada unidade foi ponderada de acordo com a sua importância na favorabilidade à ocupação urbana.

Com a padronização das variáveis, em um único sistema de mensuração, é possível aplicar-lhes técnicas complexas de geoprocessamento que permitem gerar importantes resultados para pesquisas.

2.9 - Técnicas de Geoprocessamento

De acordo com Câmara et al. (1996), “o termo Geoprocessamento denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica”. Assim, tem-se no Geoprocessamento uma tecnologia que reúne diversas técnicas de coleta, armazenamento, processamento e análise de dados geográficos. Sendo assim possui inúmeras técnicas robustas, capazes de auxiliar no entendimento de um fenômeno ou processo estudado, sendo a álgebra de mapas umas dessas técnicas.

Álgebra de mapas, de acordo com seu nome, trata-se de uma operação matemática onde seus fatores e produtos são mapas provenientes de dados geográficos. Para Barbosa (1997), o termo Álgebra de Mapas é utilizado, na literatura de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, para denotar o conjunto de operadores que manipulam campos geográficos (imagens, mapas temáticos e modelos numéricos de terreno).

Essas operações servem para manipular dados, afim de classificá-los, ou encontrar suas correlações, tematicamente em função de um fenômeno.

Tomlin (1990), utilizou esse termo para indicar o conjunto de procedimentos de análise espacial em Geoprocessamento, que produz novos dados, a partir de funções de manipulação aplicadas a um ou mais mapas. Sendo assim, a aplicação de operações matemáticas em mapas, como somas, subtração, multiplicação. Em geral mapas são elaborados com variáveis individuais, mas fenômenos mais complexos exigem que diversas variáveis sejam integradas de maneira conjunta.

Barbosa (1997) ressalta, ainda, que, „„a Álgebra de Mapas compõe uma linguagem especializada para realizar operações que tem tanto um sentido matemático, quanto cartográfico e espacial““. Estas operações, ainda de acordo com Barbosa (1997), podem ser agrupadas em três grandes classes:

Pontuais: a saída da operação é um mapa cujos valores são função apenas dos valores dos mapas de entrada em cada localização correspondente. Podem operar apenas sobre um mapa (fatiar um modelo numérico de terreno) ou realizar intersecções entre conjuntos espaciais (operações booleanas entre mapas temáticos). Vizinhança: o resultado é um mapa cujos valores dependem da vizinhança da localização considerada, como a filtragem espacial de uma imagem e o cálculo de declividade de um MNT. Zonais: definidas sobre regiões específicas de um mapa de entrada, onde as restrições são fornecidas por outro mapa. Um exemplo seria, um mapa de solos e um mapa de declividade da mesma região, para se obter a declividade média para cada tipo de solo.

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Área de estudo

3.1.2 - 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 2).

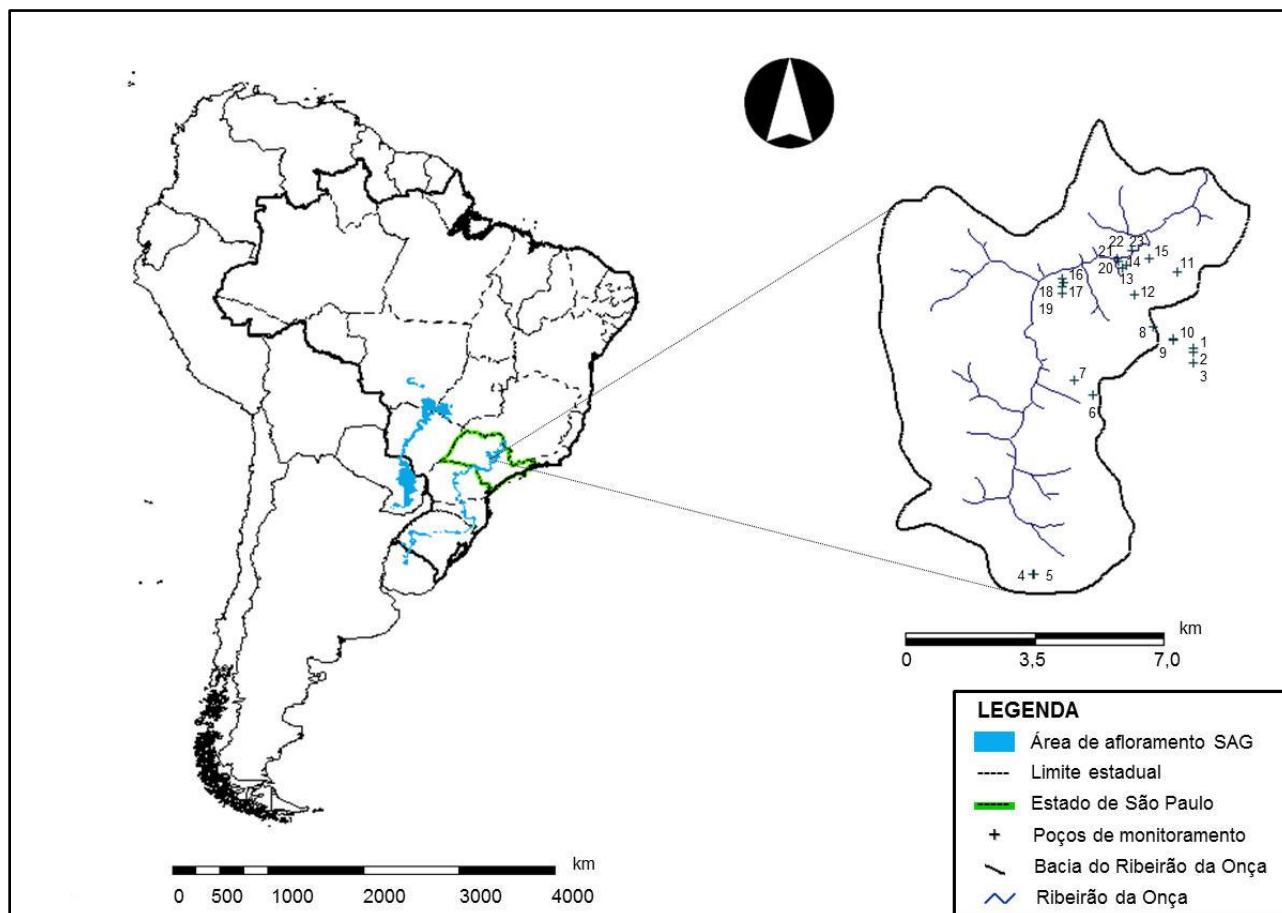


Figura 2. Mapa de localização da Bacia do Ribeirão da Onça.

Fonte: Manzione et al (2012)

3. 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 (Figura 3).

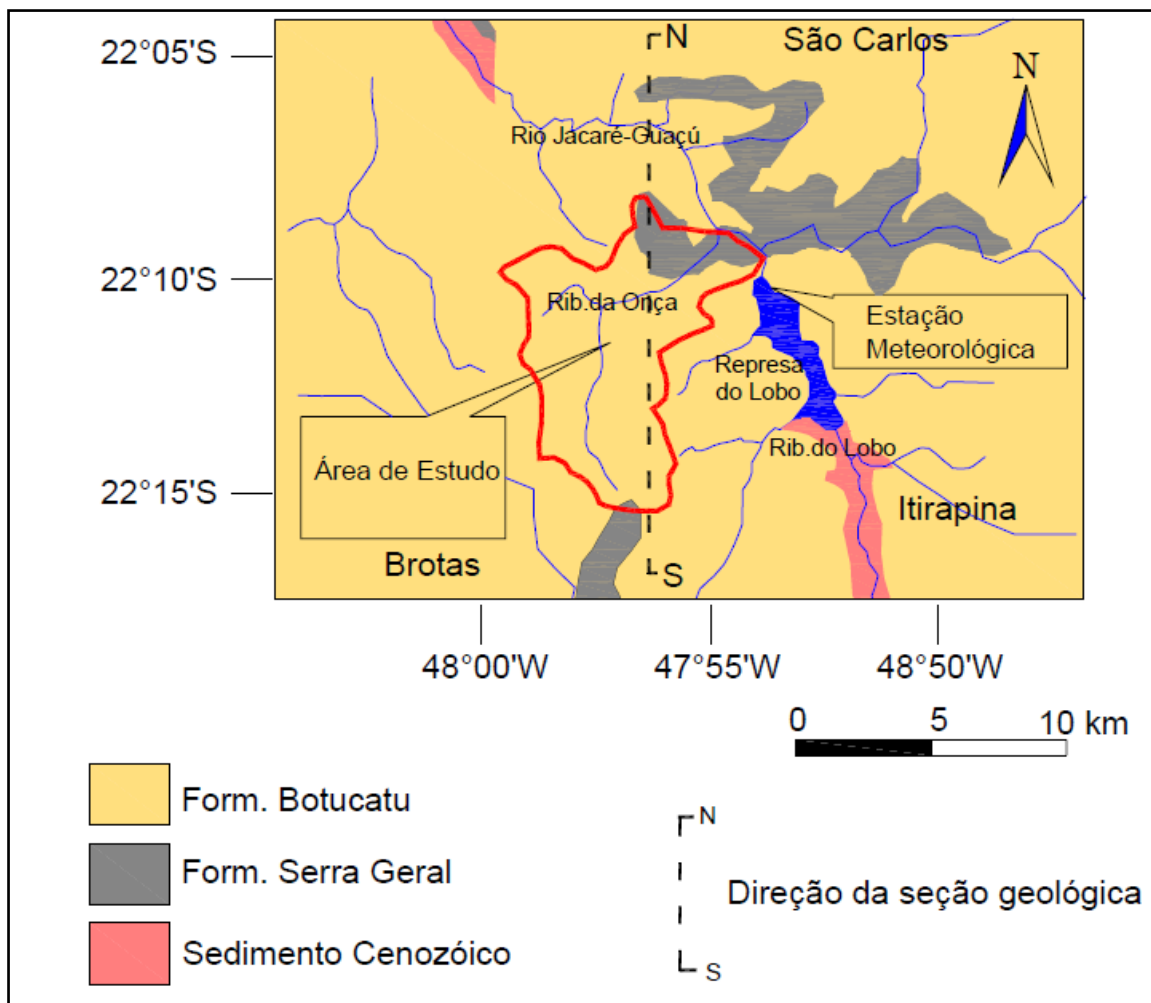


Figura 3. Mapa geológico da área de estudo.

Fonte : Sistema de informações para o gerenciamento dos Recursos hídricos do estado de São Paulo, SigRh (2008).

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. Castro Júnior (2008), cita ainda, a presença dos solos, atualizados segundo a Embrapa (2013), como Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico; Latossolo Vermelho Eutrófico; 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.

As características fisiográficas da bacia segundo Mattos et al. (1984) e Preto Filho (1985), Pompeo (1990) elaboraram, com base em mapa de escala 1:10 000 são :

- Área de drenagem igual a 65 km²;
- Perímetro 42 km;
- Comprimento axial 11 km;
- Extensão do curso d'água principal igual a 16 km;
- Comprimento total do curso d'água 55 km;
- Altitude máxima 840 m;
- Altitude mínima 640 m;
- Declividade média igual a 7,6 m.km⁻¹.

Economicamente, a bacia pode ser considerada de uso exclusivamente agrícola, sem áreas consideradas de pavimentação, ou de uso industrial, na figura 4 estão algumas imagens da área em estudo.

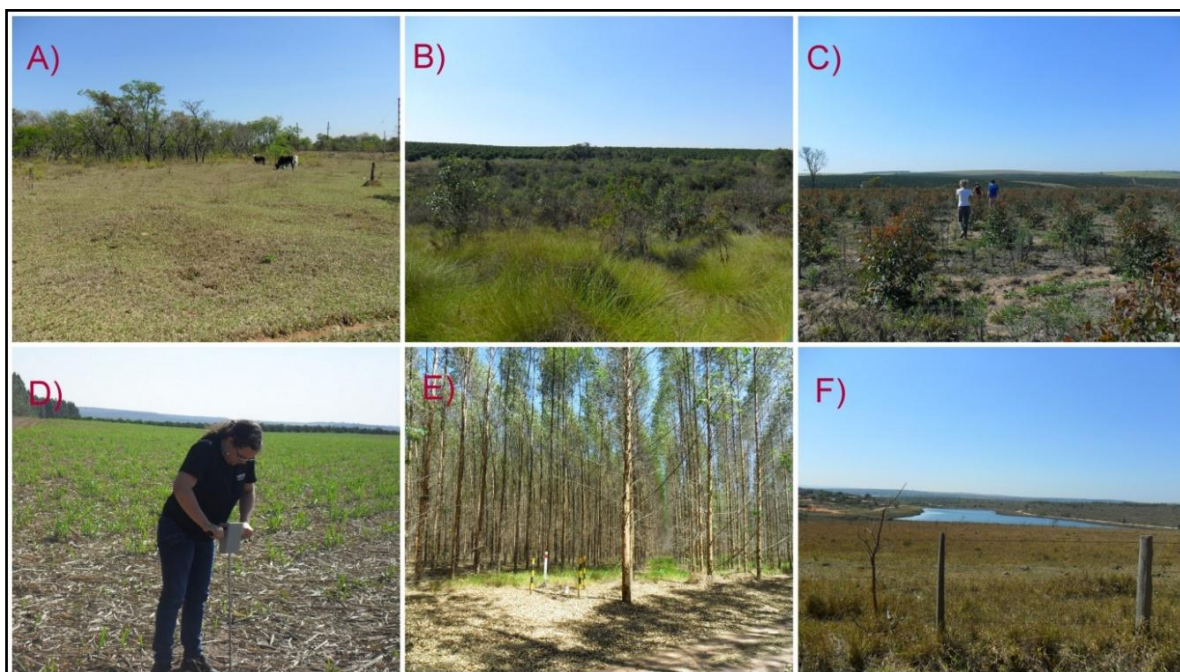


Figura 4. Diferentes usos do solo na bacia (A= Uso para agropecuária, B= Resquício de Cerrado e ao fundo cultivo de citros, C= Eucalipto novo, D) Cana nova, E) Eucalipto adulto, F= Pastagem).
Fonte: Paes e Manzione (2012).

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 5). Conseqüentemente, a bacia está exposta a mecanismos potenciais de contaminação decorrente de atividades agrícolas (WENDLAND et al., 2007).

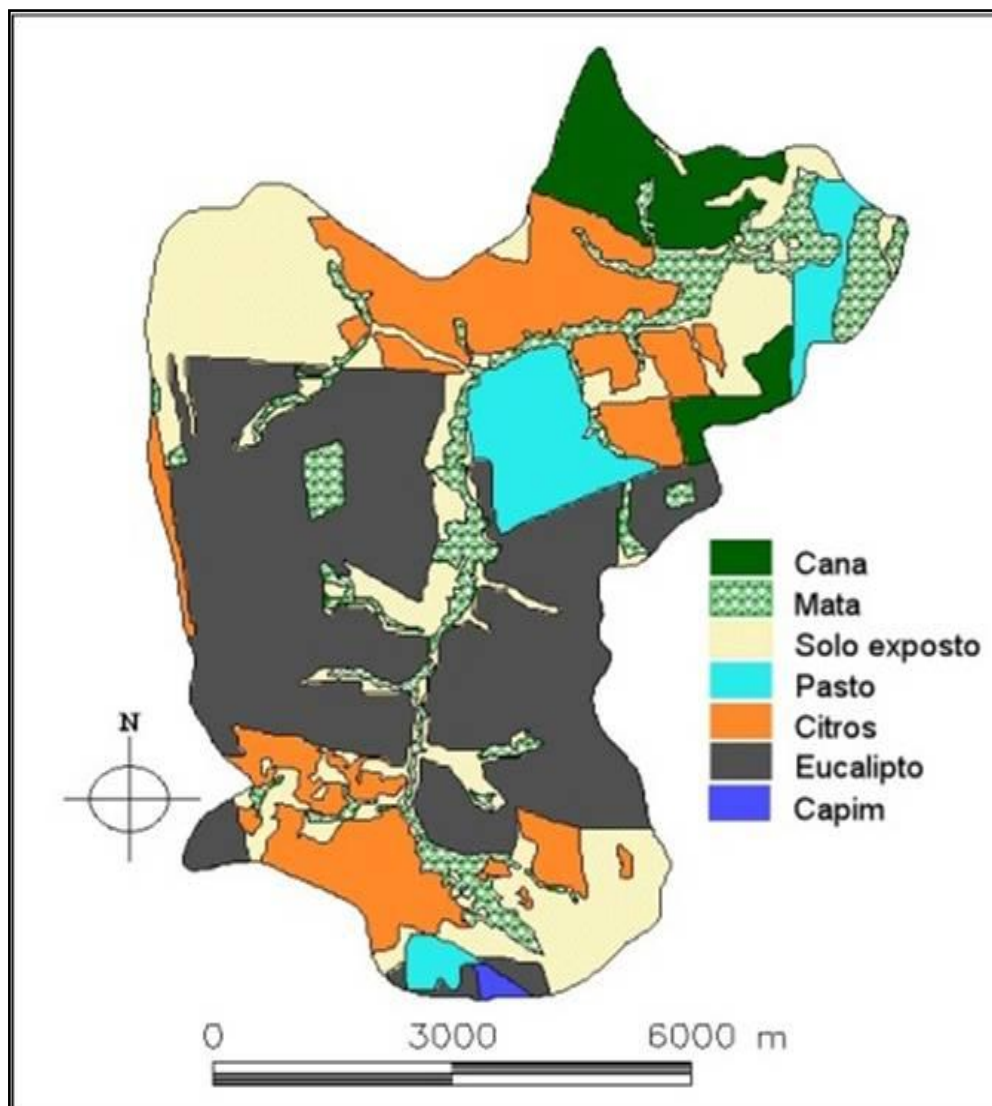


Figura 5. Mapa de ocupação do solo da Bacia do Ribeirão da Onça, ano de 2011.

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.

5. 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 (Figura 6), que quinzenalmente são monitorados. Esse monitoramento é realizado por alunos do Laboratório de Hidráulica e Saneamento, da USP de São Carlos.

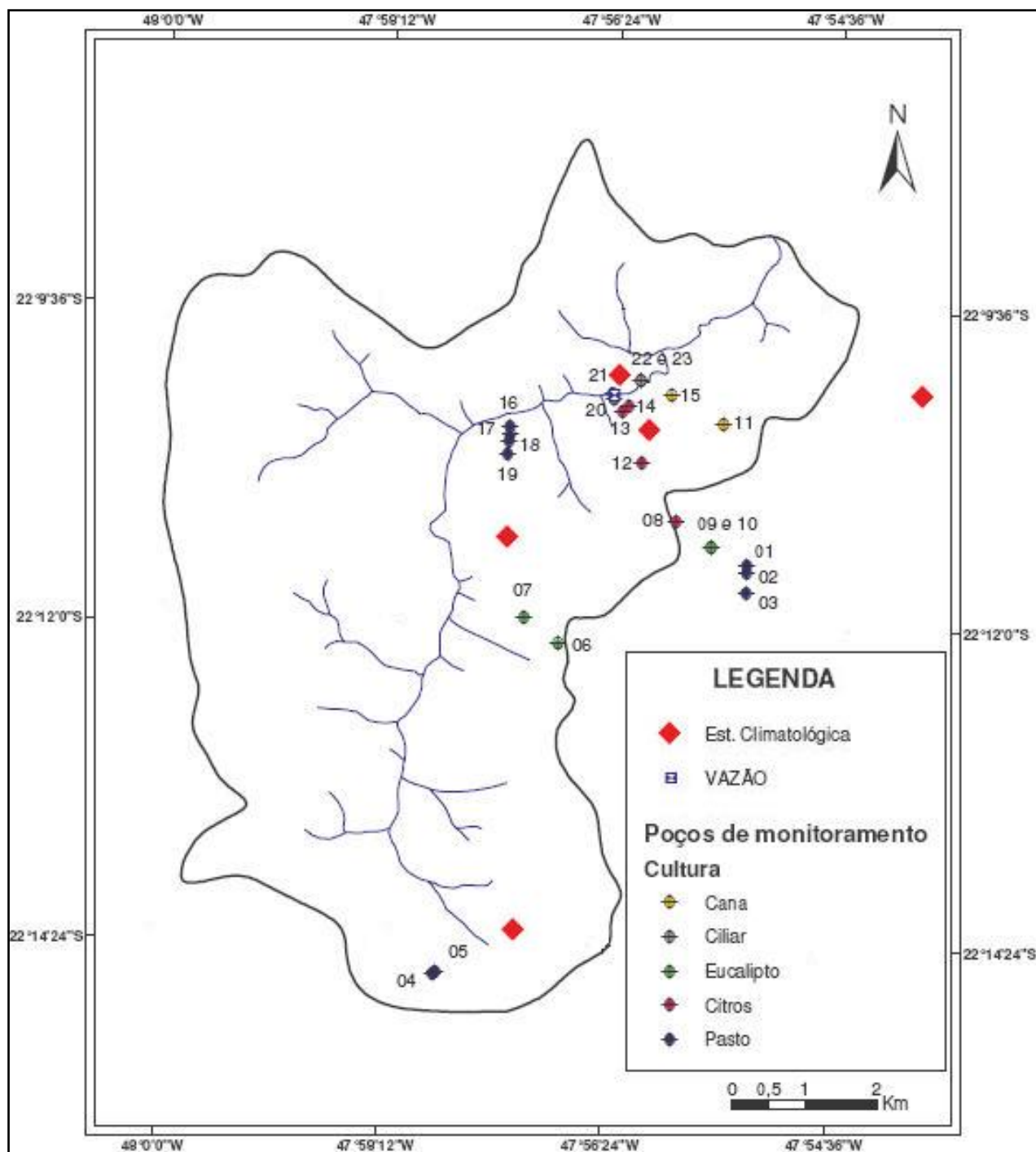


Figura 6. Localização dos poços e instrumentos na Bacia do Ribeirão da Onça, Brotas/SP.

Fonte :Gomes (2006).

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 dedemonstrar 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).

3. 2 -Modelagem dos dados

3. 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 (ISAAKS; SRIVASTAWA, 1989).

Através da krigagem foi modelado a 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 pixels (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 Isaaks 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 %.

3.2. 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 7, proposto por Hengl (2009):

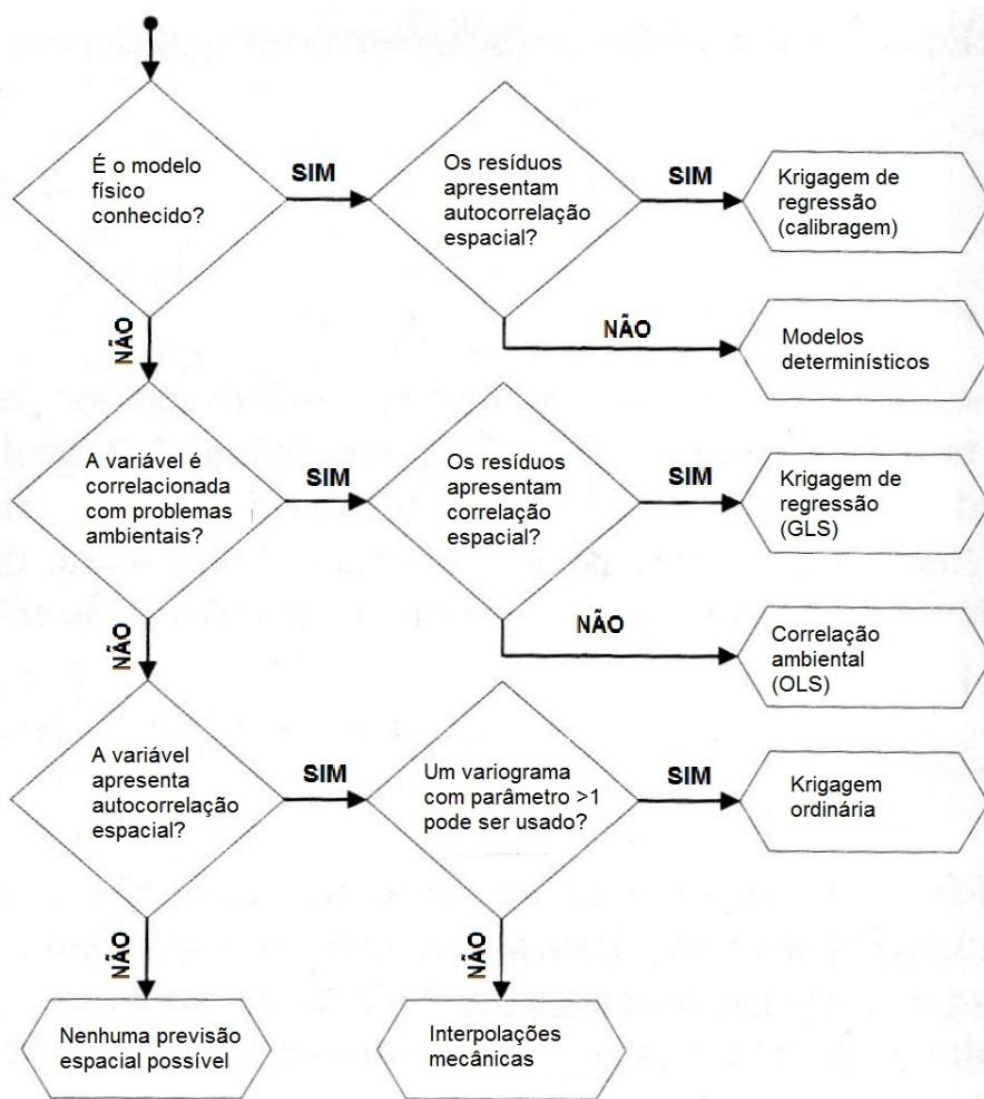


Figura 7. Fluxograma conceitual para definição de modelos de predição espacial.
Fonte: Hengl (2009).

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 ; 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.

3. 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 (X_1, X_2, \dots). 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):

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

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:

$$Y_i = \alpha + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \beta_3 x_{i3} + \dots + \beta_i x_{ii} + \varepsilon_i \quad (4)$$

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

3.3 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. Marro et al (2011), mostra a diferença entre a concepção clássica (Equação 5), e a lógica fuzzy (Equação 6), considerando um conjunto A , e um elemento X , com relação a esse conjunto

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{se, somente se, } x \in A \\ 0 & \text{se, somente se, } x \notin A \end{cases}$$

(Eq. 5)

$$\mu(x) \begin{cases} 1 & \text{se, somente, } x \in A \\ 0 & \text{se, somente, } x \notin A \\ 0 \leq \mu(x) < 1, & \text{se } x \text{ pertence parcialmente a } A \end{cases} \quad \text{Eq. 6}$$

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.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 - Análise exploratória dos dados

Inicialmente, foram verificadas as estatísticas descritivas do conjunto de dados composto pelas seguintes variáveis permeabilidade, resistência do solo à penetração, areia, argila, silte, fração grossa, fração muito grossa, fração média, fração fina, fração muito fina, distância de drenagem, coeficiente de cultura, e declividade.

Foram calculadas medidas de posição, dispersão e forma.

4.1.1 -Medidas de posição

Como medidas de posição, foram analisadas os valores de média, mediana, moda, valores máximos e mínimos, para os dados das variáveis preditoras. Os resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Medidas de posição calculadas para as variáveis em estudo na bacia.

	Média	Mediana	Mínimo	Máximo
Dh (m)	4,79	4,50	0,96	8,59
Res (kPa)	1699,00	1765,00	1087,00	2306,00
Res Máx (kPa)	3219,00	3171,00	1615,00	5632,00
K (cm/s)	1,69 E-3	1,68 E-3	0,30 E-3	4,35 E-3
AR (%)	90,99	91,65	78,00	95,60
SL (%)	67,94	68,00	40,00	98,00
ARG (%)	16,24	6,00	0,30	79,60
G (%)	4849,00	4550,00	1060,00	11330,00
MG (%)	0,65	0,35	0,00	2,18
M (%)	34,22	33,87	20,69	54,37
F (%)	42,44	42,92	28,08	50,76
MF (%)	17,84	17,37	4,78	36,63
Kc	0,91	0,90	0,80	1,04
DD(m)	9,25	4,15	5,00	26,30
ELEV(m)	722,11	717,00	687,00	768,00
DECLI(m)	6,24	6,04	0,00	14,14

Dh = Amplitude de Oscilação do nível freático, Res (kPa) = Resistência média do solo à penetração, Res Máx (kPa)= Resistência máxima do solo à penetração, K= Permeabilidade, AR = Areia, SL= Silte, ARG = Argila, G= Fração areia grossa, MG= Fração areia muito grossa, M= Fração areia média, F= Fração areia fina, MF= Fração areia muito fina, Kc = Coeficiente de cultura, DD= Distancia da drenagem, ELEV=Elevação do terreno, DECLI=Declividade.

As medidas de posição evidenciam características gerais dos dados, nesse caso observou-se que os dados de precipitação e evapotranspiração, não variam muito em relação a valor máximo, mínimo e médio. Entretanto variáveis como amplitude de oscilação de nível freático, e frações do solo, mostram como a média pode ser generalizante, quando há grande variação dos valores dos dados do conjunto analisado.

4.1.2 - Medidas de dispersão

Como medidas de dispersão foram analisadas o desvio padrão, a variância e o coeficiente de variação, a fim de se quantificar a variância dos dados. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Medidas de dispersão calculadas para as variáveis em estudo.

	Variância	Desvio Padrão
Dh (m)	6,16	6,55
Res (kPa)	1381,70	3717,12
Res Máx (kPa)	1258,18	1121,69
K (cm/s)	1,48 E-2	1,20 E-2
AR (%)	1802,46	42,45
SL (%)	4057,86	20,14
ARG (%)	6557,02	25,61
G (%)	7,73	2,77
MG (%)	0,47	0,68
M (%)	51,57	7,18
F (%)	28,03	5,29
MF (%)	36,95	6,08
Kc	7,00E-2	0,87
DD (m)	91,666	9,57
ELEV (m)	590,65	24,30
DECLI (m)	16,58	4,07

Dh = Amplitude de Oscilação do nível freático, Res (kPa)

= Resistência média do solo à compactação, Res Máx

(kPa)= Resistência máxima do solo à compactação, K=

Permeabilidade, AR = Areia, SL= Silte, ARG = Argila,

G= Fração areia grossa, MG= Fração areia muito grossa,

M= Fração areia média, F= Fração areia fina, MF= Fração

areia muito fina, Kc = Coeficiente de cultura, DD=

Distância da drenagem, ELEV= Elevação do terreno,

DECLI= Declividade.

Observo-se que nas medidas de dispersão, que os maiores valores de desvio padrão ocorreram para os dados de resistência do solo à penetração, que neste caso está evidenciando a compactação, por se tratar de dados que evidenciam a condição da estrutura do solo, apresentam grande variação, mesmo em pequenas distâncias espaciais. Em relação à variância os dados mostraram-se consideráveis, refletindo uma maior dificuldade na modelagem espacial dos dados.

4.1.3 -Medidas de forma

Para análise da distribuição dos dados e da forma como ocorre essa distribuição, foram calculados valores de assimetria e curtose e confeccionado histogramas de frequência dos dados. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Medidas de forma calculadas para as variáveis em estudo.

	Curtose	Assimetria
Dh (m)	0,20	-1,23
Res (kPa)	0,36	-0,55
Res Máx (kPa)	0,19	-0,15
K (cm/s)	0,46	-0,38
AR(%)	1,59	-2,31
SL(%)	4,20	17,14
ARG(%)	0,82	0,36
G (%)	0,75	-0,36
MG (%)	0,82	0,63
M (%)	1,24	-3,67
F (%)	1,38	2,93
MF (%)	1,32	6,73
Kc	-0,25	-1,44
DD	0,93	-0,82
ELEV	0,28	-0,91
DECLI	0,37	-0,96

Dh = Amplitude de Oscilação do nível freático, Res (kPa) = Resistência média do solo à compactação, Res Máx (kPa)= Resistência máxima do solo à compactação K= Permeabilidade, PREC_11 = Precipitação 2011 AR = Areia, SL= Silte, ARG = Argila, G= Fração areia grossa, MG= Fração areia muito grossa, M= Fração areia média, F= Fração areia fina, MF= Fração areia muito fina. Kc = Coeficiente de cultura, DD= Distancia da drenagem, ELEV=Elevação do terreno, DECLI=Declividade.

Observa-se que, as variáveis CM, k, SL, AR, ARG, G, MG, M, F e MF, apresentaram curtose maior que 0,263, portanto possuem achatamento da curva de distribuição platicúrtica. Já, as variáveis Dh, CMAX, obtiveram valores de curtose menores que 0, 263, portanto o achatamento da curva é leptocúrtica. Em relação à assimetria, as variáveis SL, MG, MF e F apresentaram valores maiores que 0, sendo curvas de distribuição assimétrica positivas. E as variáveis Dh, Res, Res_Máx, K, AR, G, M, KC,

ELEV, DD e DECLI apresentaram valores menores que 0, sendo curvas assimétricas negativas.

4.2 - 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, 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 entre 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 (MONTGOMERY e RUNGER, 2012; LEVINE et al, 2011) critérios comuns , 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 (C_p). Floriano et al. (2006), com o objetivo de ajustar e selecionar modelos tradicionais para série temporal de dados de altura de árvores utilizaram o coeficiente de determinação (R^2), a estatística C_p de Mallows e a análise gráfica dos resíduos para comparar os modelos. De acordo com Teixeira et al. (2013), um valor baixo de C_p 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 4.

Tabela 4. 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	X
10	81,6	62,3	9,1	1,6446	X				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	X
11	81,9	58,5	11,1	1,7391	X		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	X
12	82,4	53,5	11,0	1,8520	X		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	X
13	82,5	47,3	13,0	2,0258	X	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 5.

Tabela 5. 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 8), 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.

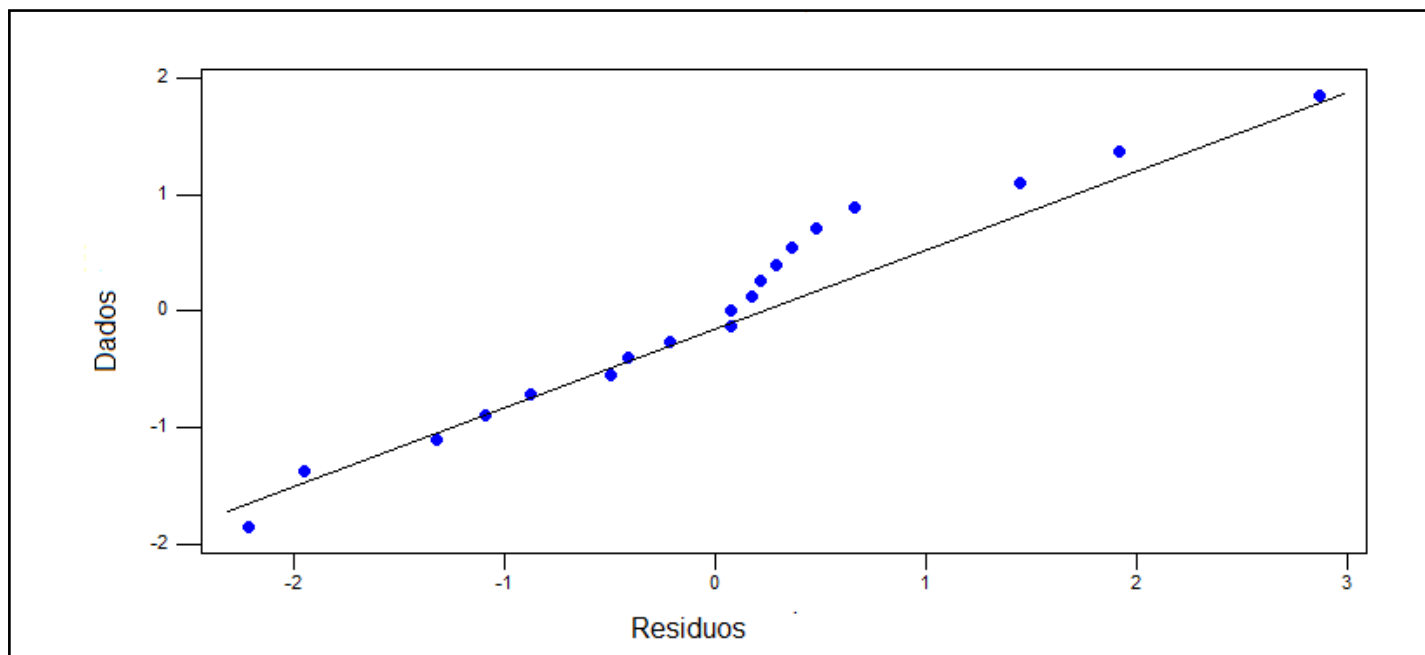


Figura 8: Gráfico de normalidade entre os dados observados e preditos.

Na Figura 12, 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 6).

Tabela 6. 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 predictoras, 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 9).

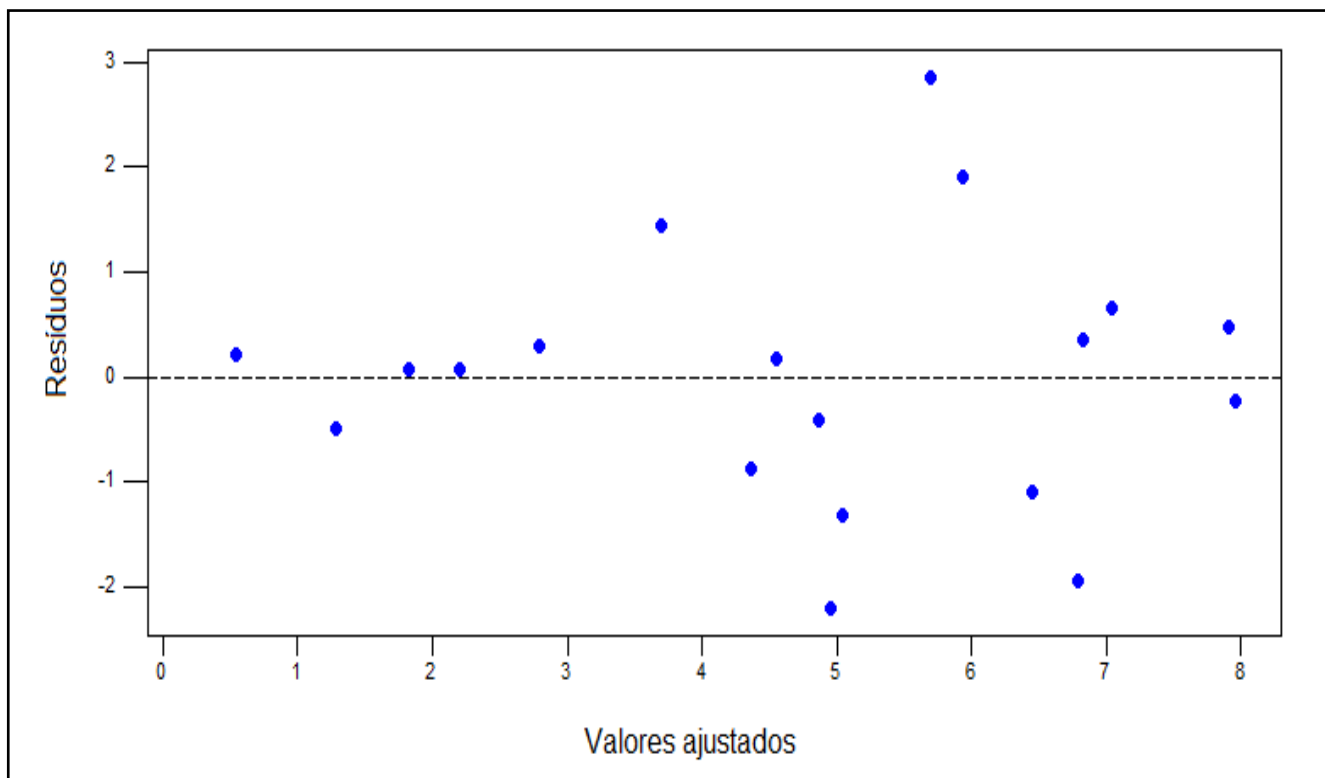


Figura 9: Gráfico de dispersão dos resíduos.

O histograma de distribuição dos resíduos demonstra que sua distribuição é normal, podendo ser observada na Figura 10.

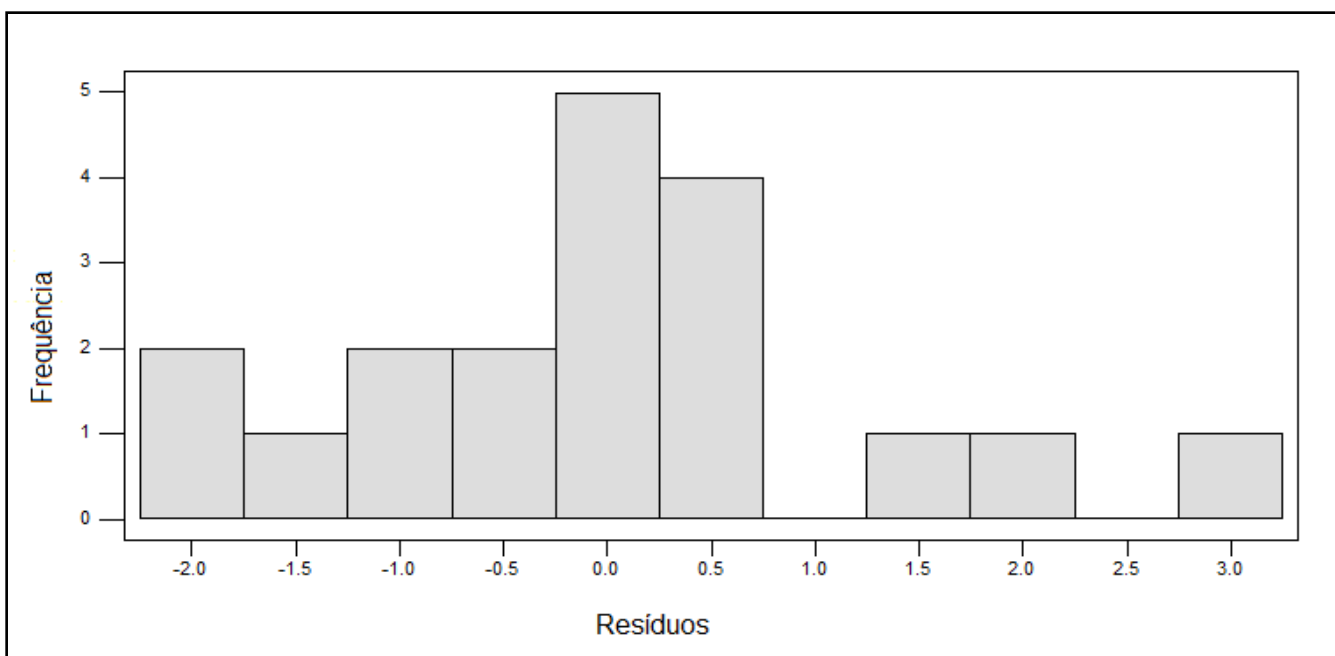


Figura 10: Histograma de distribuição dos resíduos.

Assim sendo o modelo escolhido foi a seguinte:

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

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 preditoras 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.

4.3.1 - Interpolação geoestatística dos resíduos do modelo

O variograma ajustado para interpolação dos resíduos do modelo, pode ser observado na Figura 11 e seus parâmetros espaciais na tabela 7.

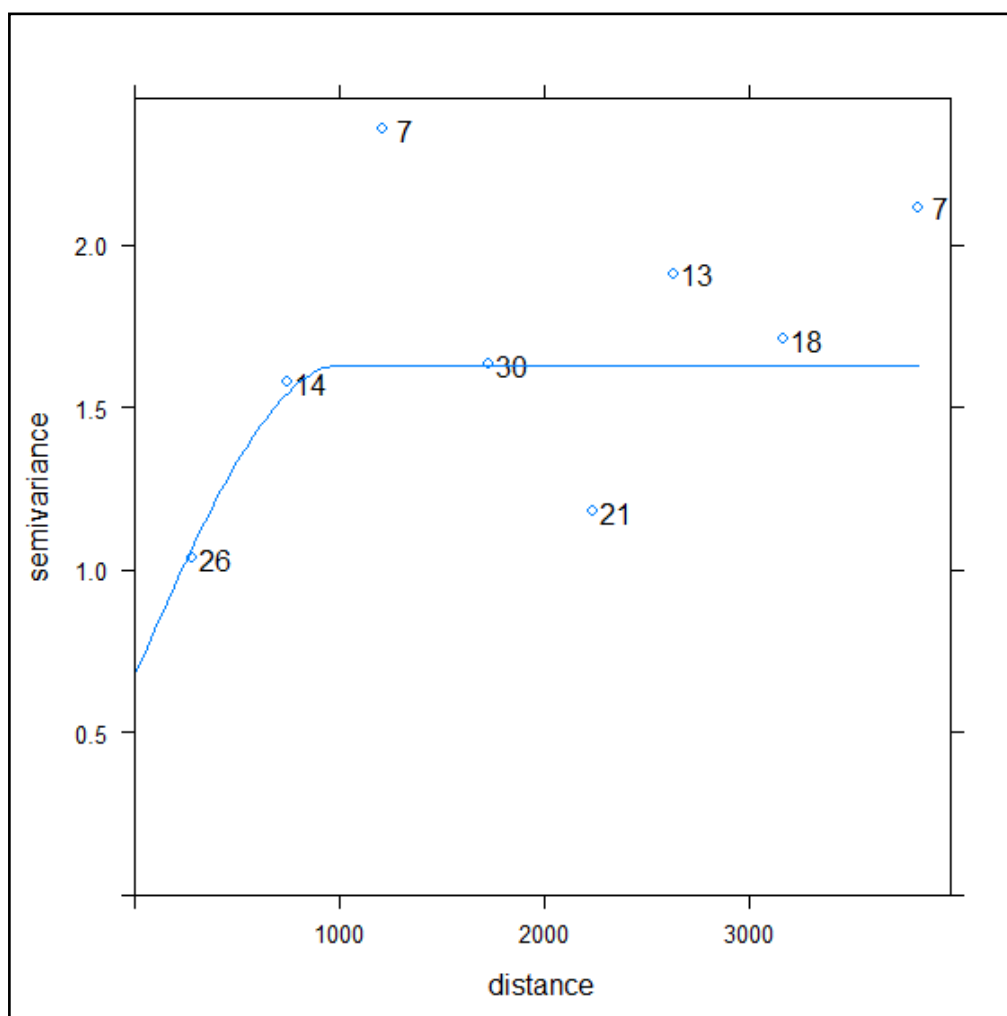


Figura 11: Variograma para análise da variabilidade espacial dos dados.

Tabela 7. Parâmetros espaciais do variograma.

Parâmetro	Efeito			Modelo	Índice de dependência espacial (IDE)
	pepita	Patamar	Alcance		
Valor	0,7	1	1,5	Esférico	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 12.

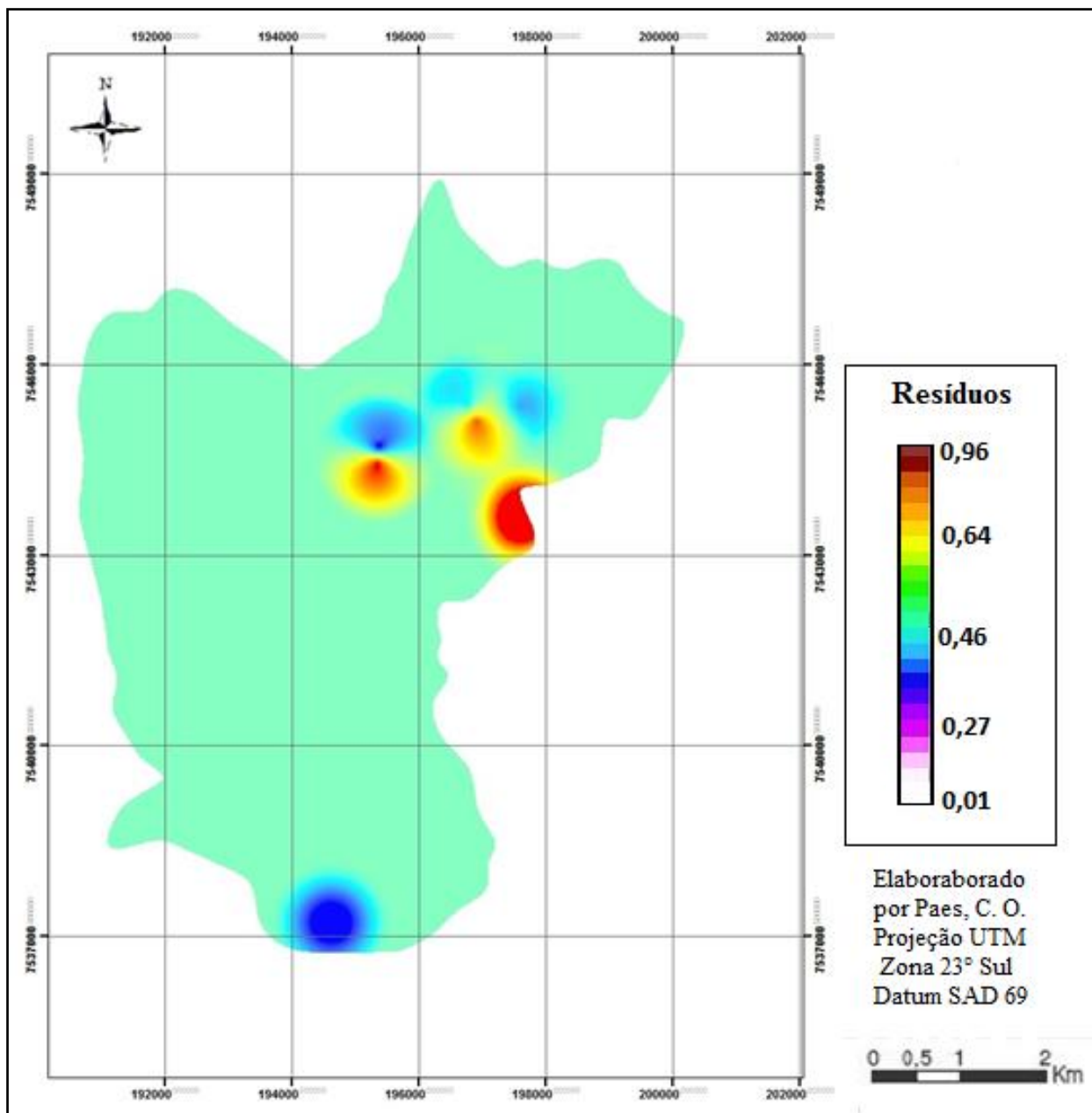


Figura 12: Mapa de resíduos do modelo.

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.

4. 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 geostatísticas, optou-se por um método de interpolação menos complexo, mas que fosse eficiente entre todas variáveis, o IDW.

4. 4. 1 Mapeamento das variáveis

Mesmo as variáveis que, já haviam sido mapeadas anteriormente, por media ponderada, foram mapeadas novamente pela técnica do Inverso quadrado da distância, para maior uniformidade do mapas (Figuras 13 a 18).

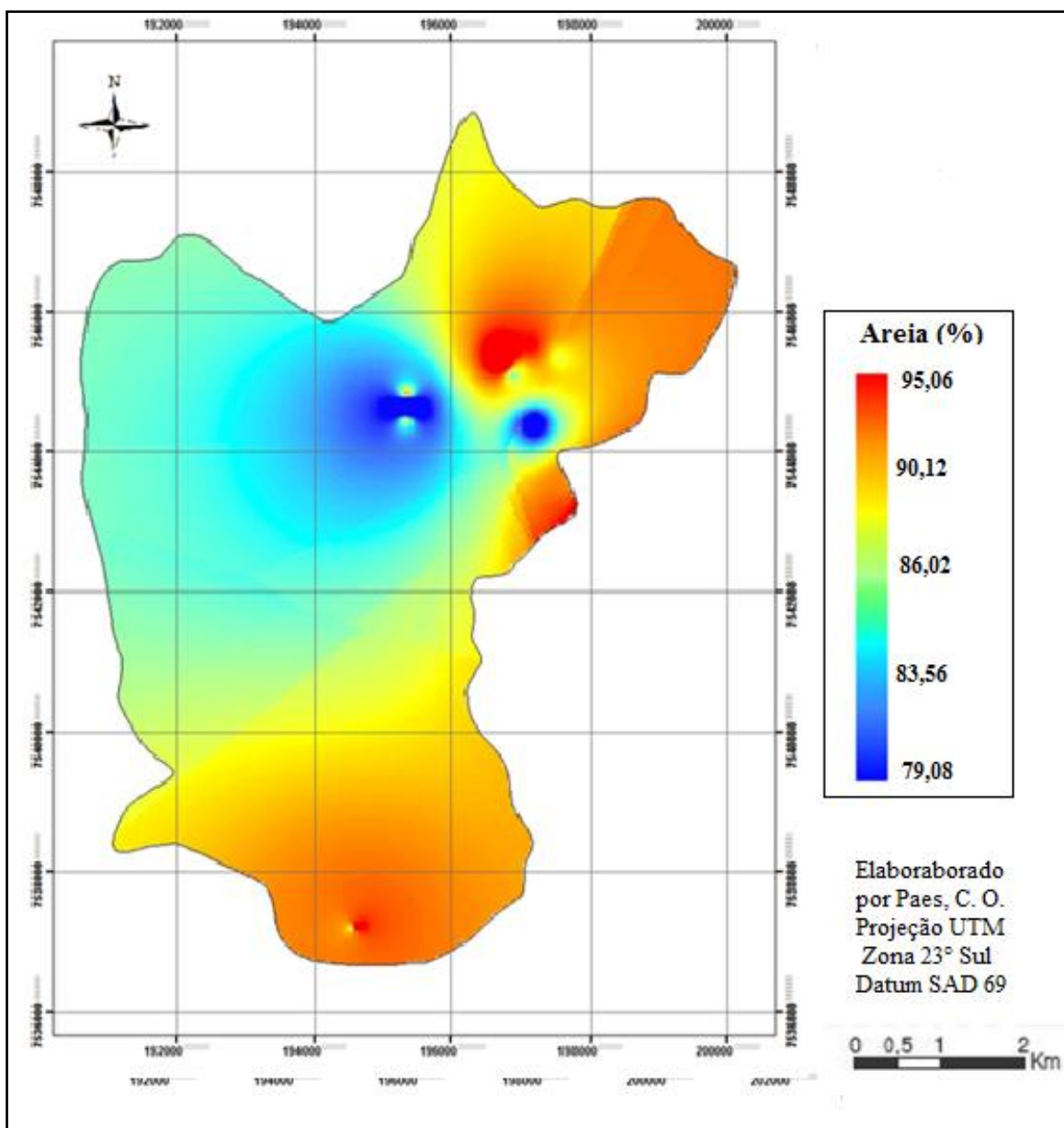


Figura 13 : Mapa de interpolação dos de areia (%) na Bacia do Ribeirão da Onça.

Em relação à porcentagem de areia na bacia, observamos que ela tem grande relevância na bacia. O que se explica também pela sua formação geológica.

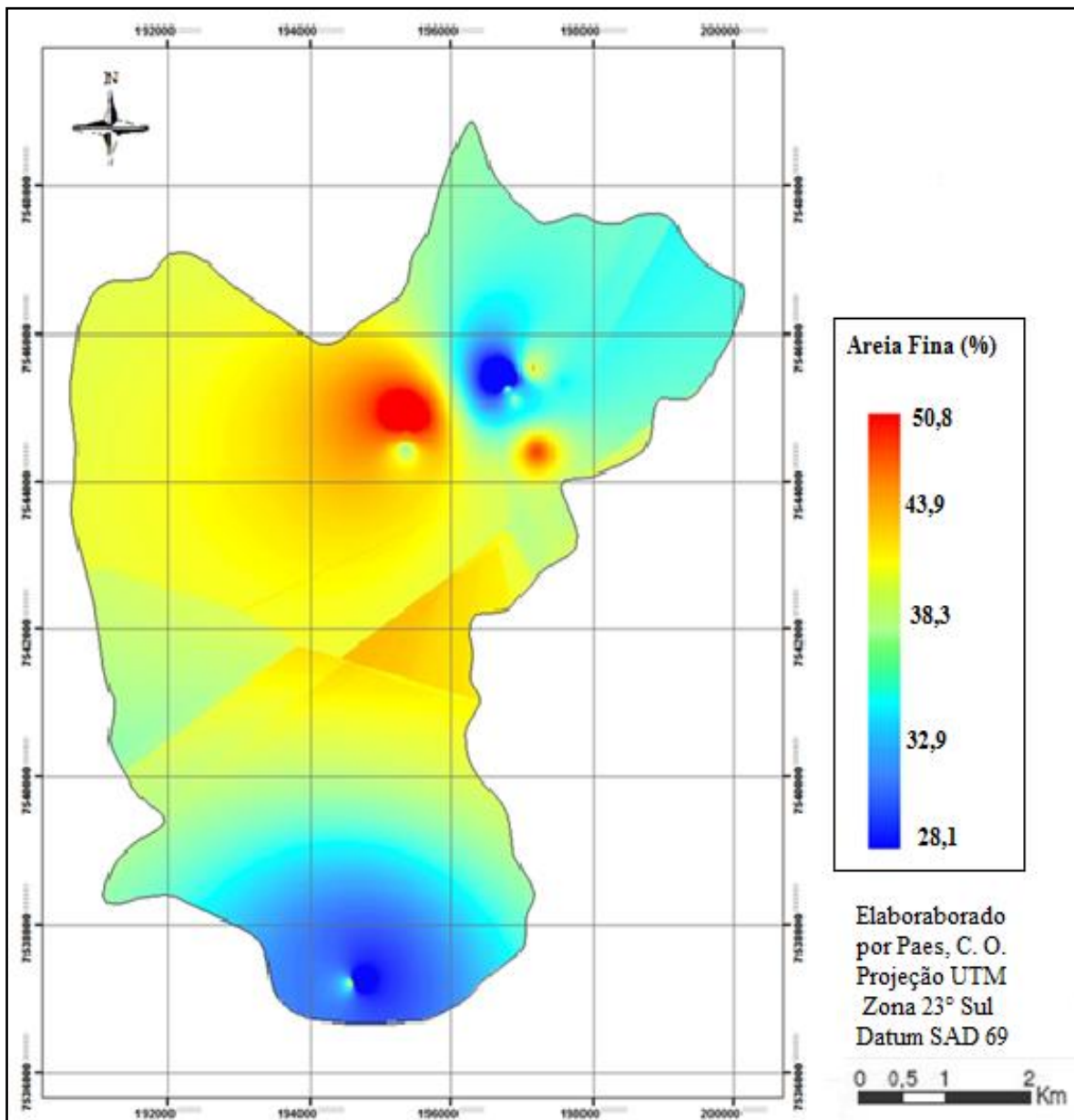


Figura 14. Mapa de interpolação dos dados de Areia Fina (%) para a Bacia do Ribeirão da Onça.

A Figura 14 demonstra quantidade significativa de areia fina na bacia, uma vez quanto mais fina for à fração de areia, mais demorado será o processo de infiltração em subsuperfície.

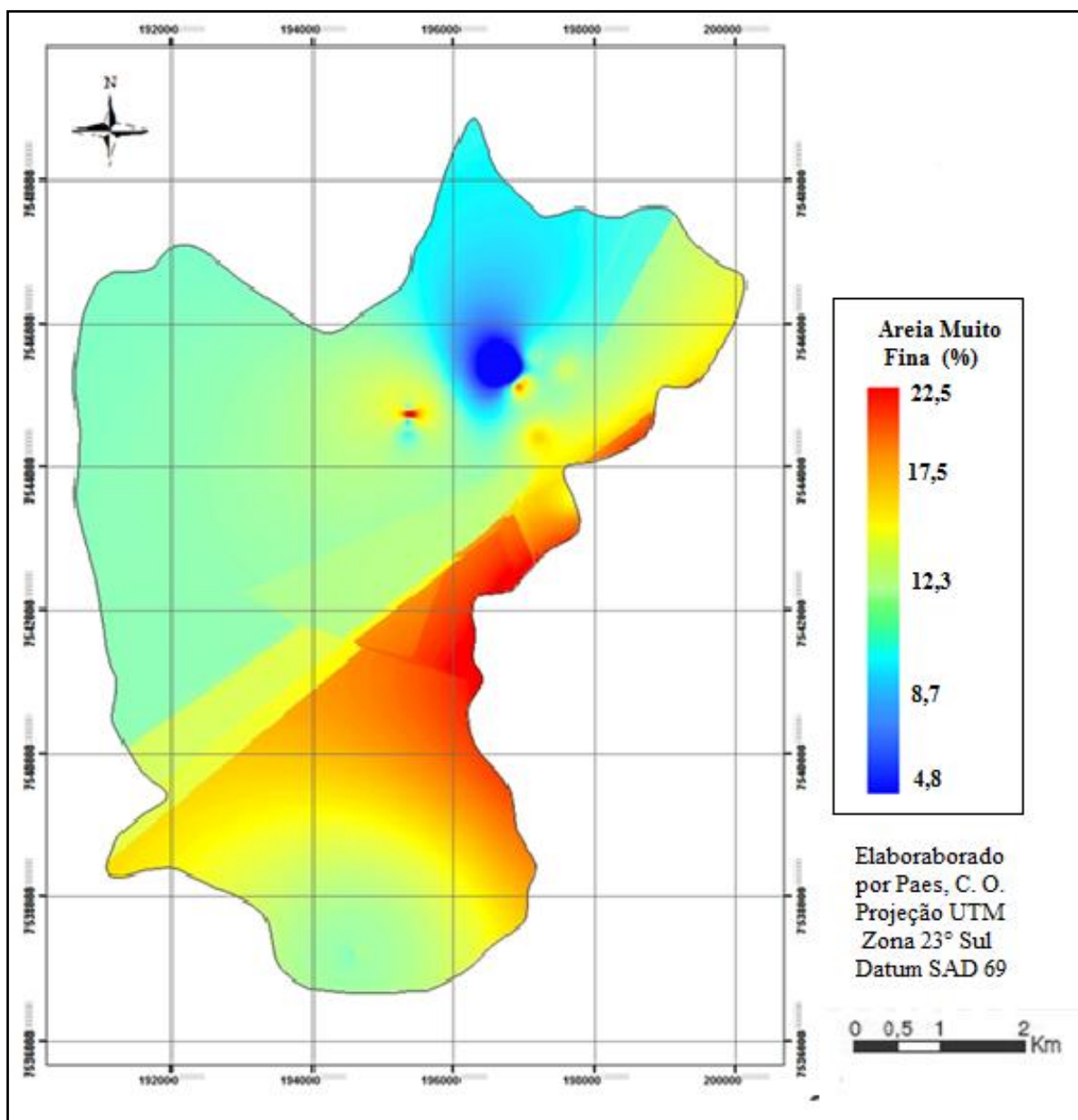


Figura 15. Mapa de interpolação de dados de areia muito fina(%) para bacia do Ribeirão da Onça.

A porcentagem de areia muito fina, apesar de ser menor que as outras, também exerce grande influência no processo de recarga, ao condicionar o processo de infiltração.

Ao analisarmos os mapas gerados, verificamos a que a maior porcentagem trata-se de areia, estando assim de acordo com Barreto (2008), que define os solos da bacia em sua maioria, como neossolos quartzarênicos, sendo assim os solos são em sua grande parte de textura arenosa. A localização das maiores e menores quantidades das frações componentes dos solos ajudam a entender os diferentes comportamentos da água no solo, até alcançar o nível aquífero.

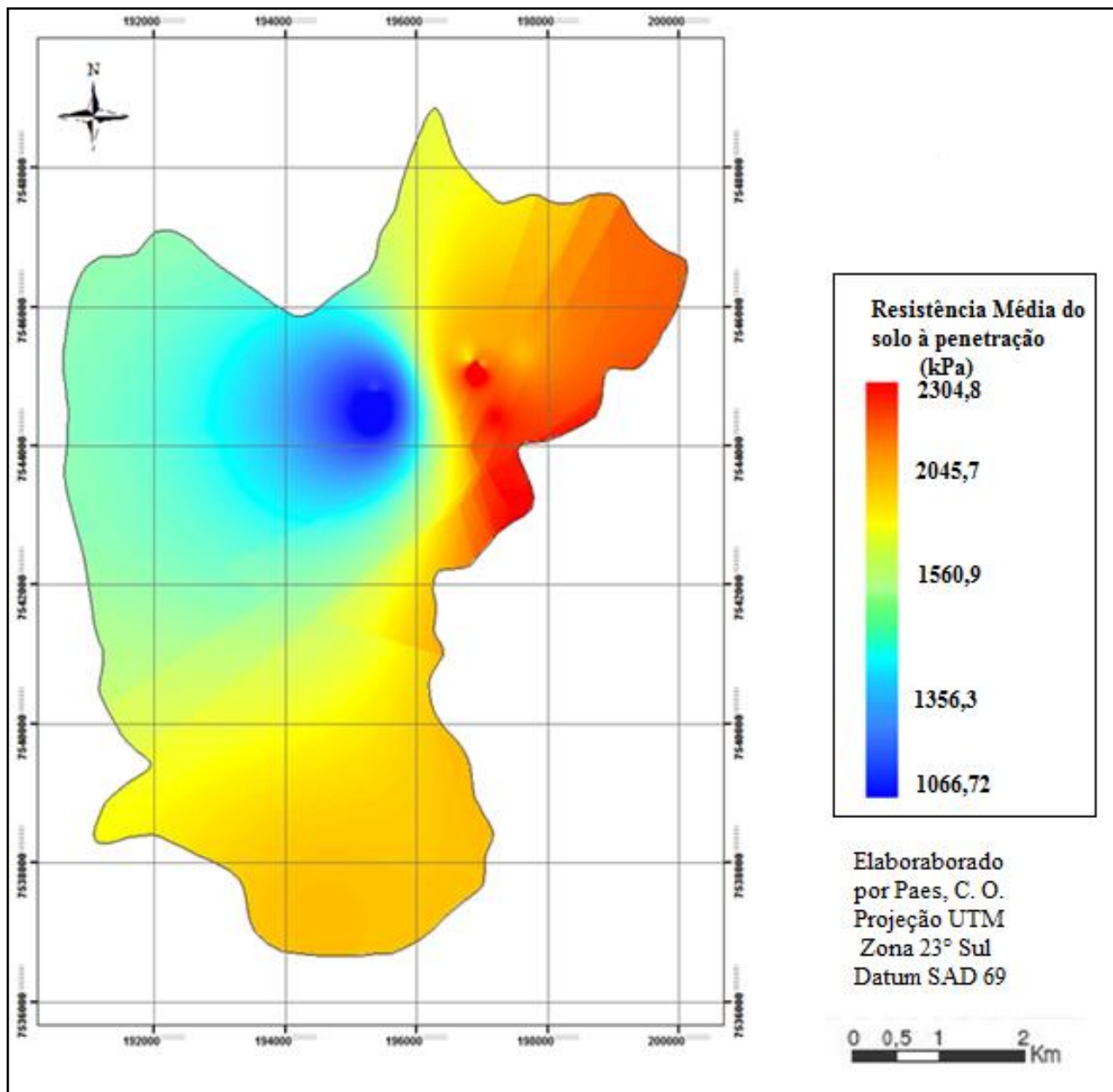


Figura 16. Mapa de interpolação de dados de resistência média do solo à penetração(kPa) para a bacia do Ribeirão da Onça.

A resistência do solo a penetração vai ter grande influência logo na subsuperfície, em relação ao processo de infiltração, quando mais resistente o solo, mais sofrerá o processo de escoamento superficial, diminuindo a quantidade de água que infiltra e assim por consequência a recarga potencial.

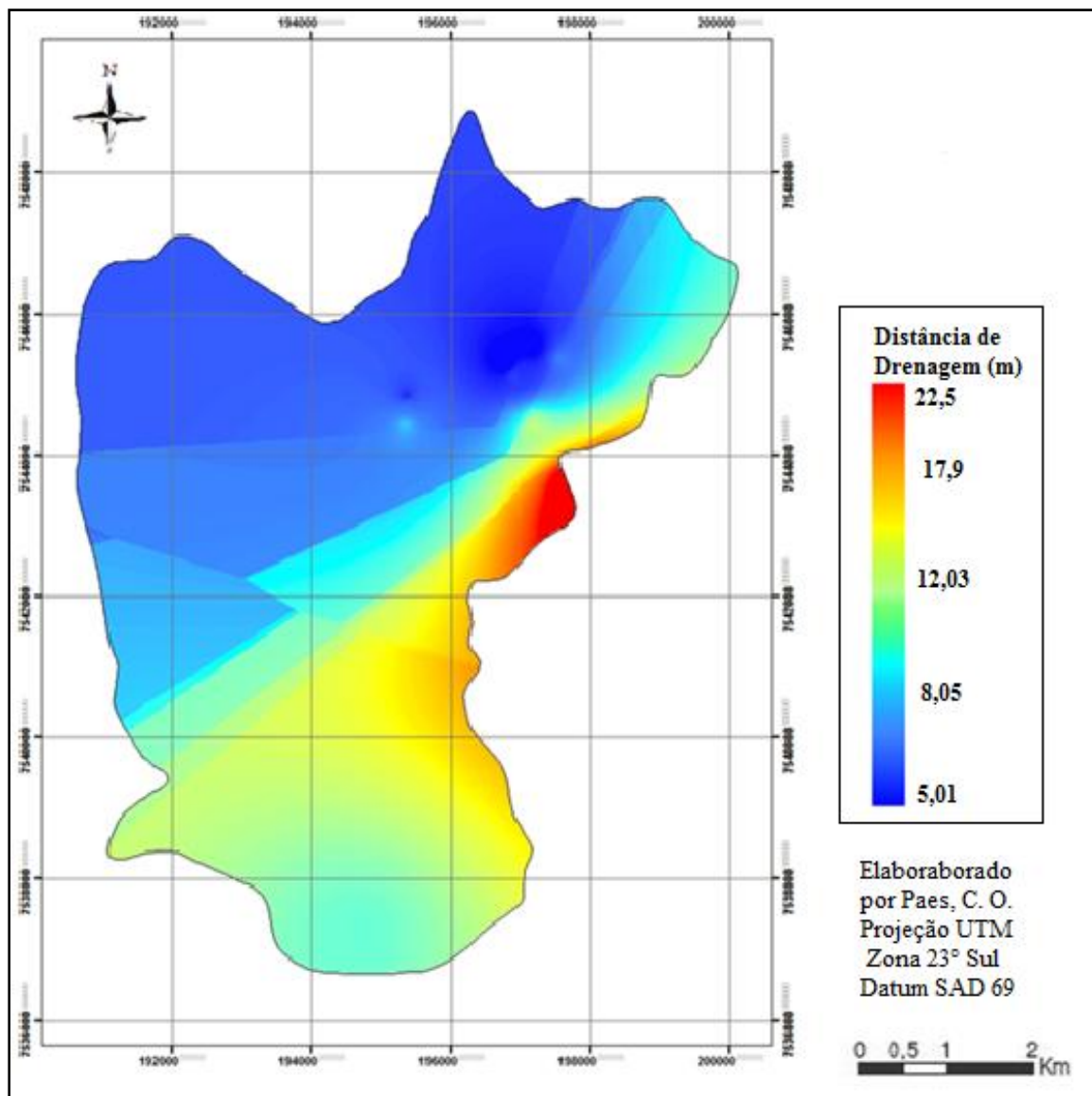


Figura 17. Mapa de interpolação de dados da distância de drenagem em relação aos poços de monitoramento (m) para a bacia do Ribeirão da Onça.

A distância entre o nível do aquífero e o rio, representa a interação entre eles, evidenciando se há maior influência na recarga nas áreas mais próximas a rede de drenagem.

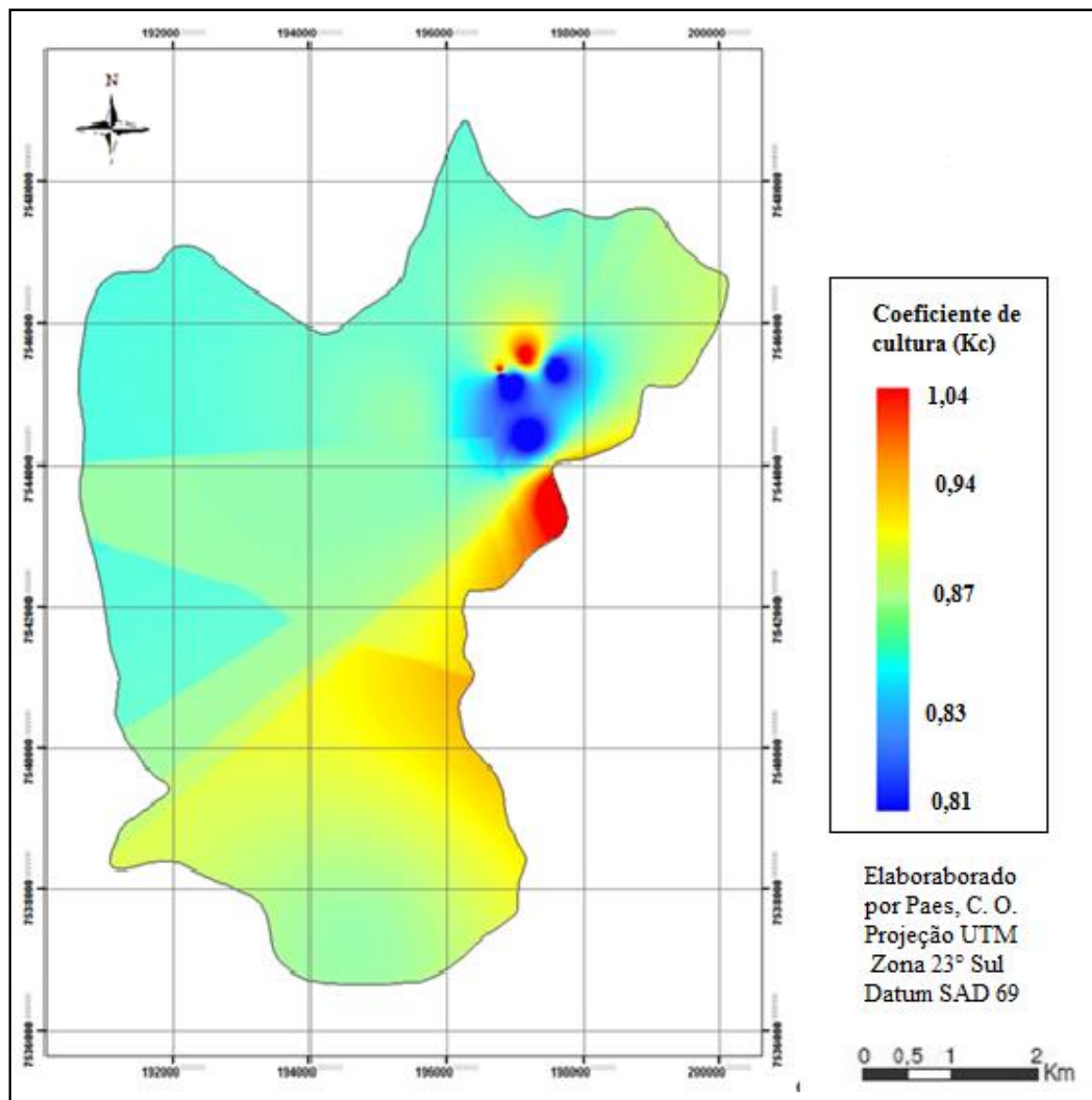


Figura 18. Mapa do coeficiente de cultura baseado nos tipos de uso do solo da bacia do Ribeirão da Onça.

O mapa de coeficiente de cultura foi baseado no tipo de cultura presente em cada ponto de medição, e torna-se relevante na recarga pelo fato de que, as necessidades hídricas influenciam na disponibilidade hídrica no solo, sendo assim na água que resta para alcançar o aquífero.

4.4.2 - 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 sua quanto menor sua pertinência (mais próximo de zero) menor será a interferência na recarga, ocorrendo o mesmo com a resistência media do solo a penetração e a distancia de drenagem, dessa forma o processo de fuzzificação para essas variáveis foi realizado ao inverso, sendo o intervalo de 1 a 0 (Figuras de 19 a 24).

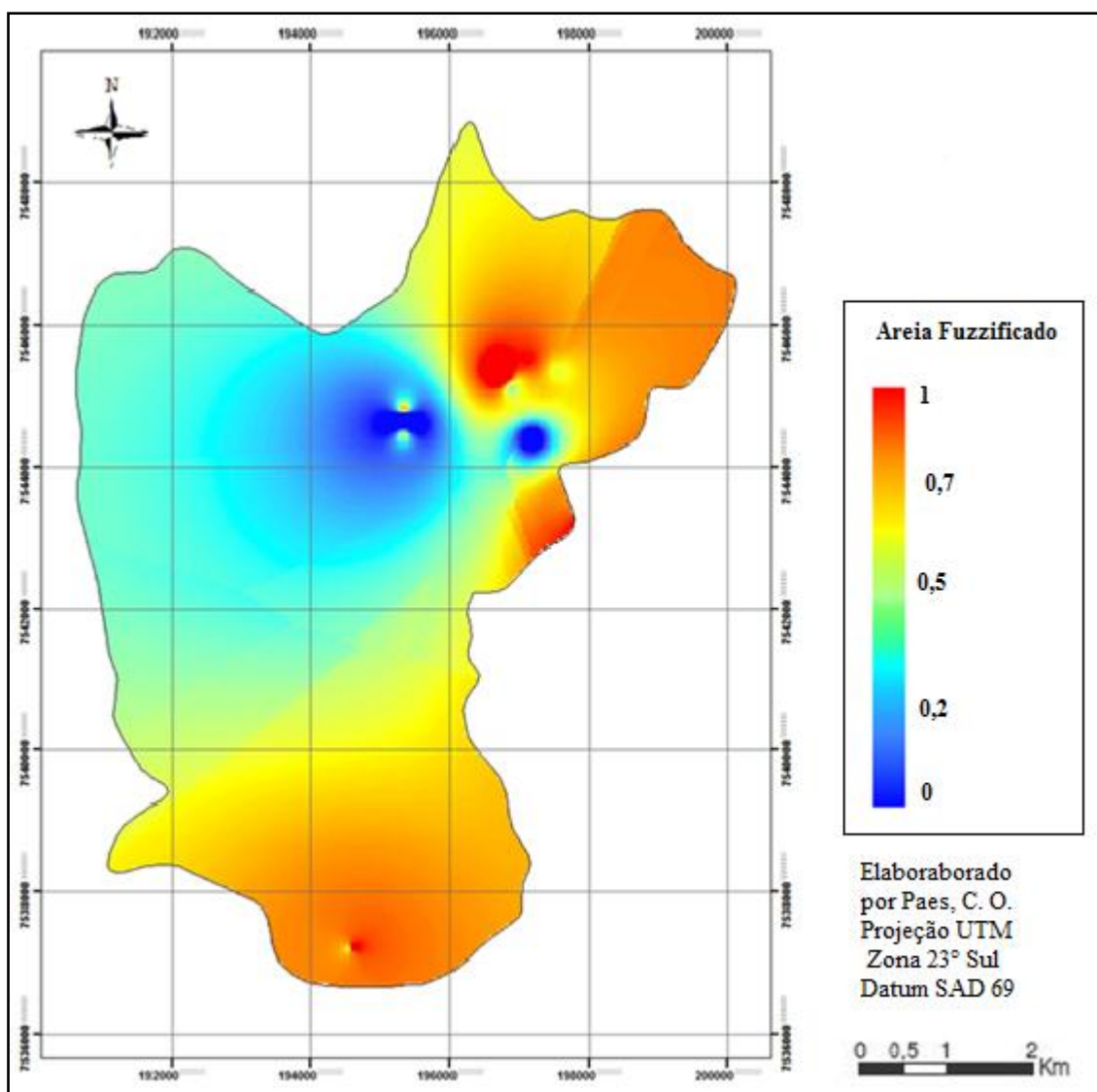


Figura 19. Mapa de Fuzzificação para a variável areia.

O mapa de fuzzificação para Areia na bacia, permite que obtenha-se os locais de maior influência desta, sendo a nordeste e ao sul da bacia, locais com maior ocorrência de areia. Esse mapa foi reescalado de 1 a 0, pois grande quantidade de areia prejudica a retenção de água no solo, sendo de influência negativa para a recarga.

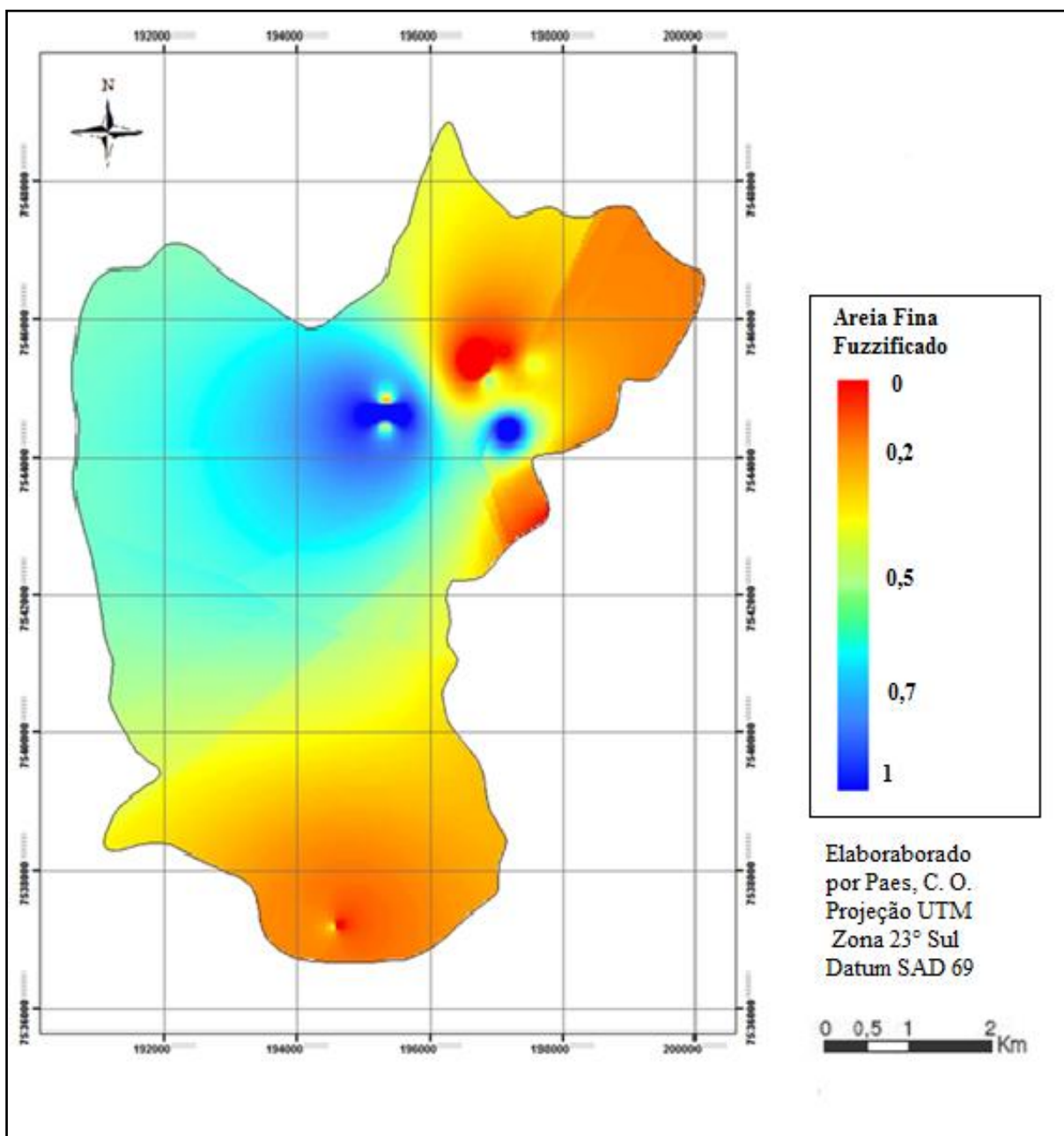


Figura 20: Mapa de Fuzzificação para Areia Fina para a bacia do Ribeirão da Onça.

O mapa de fuzzificação para areia fina, mostra que sua maior influência na bacia ocorre, em um parte central da região nordeste e ao sul da bacia. Areia fina foi reescalada de 0 a 1, pois, por ser fina colabora na retenção de água, facilitando a recarga.

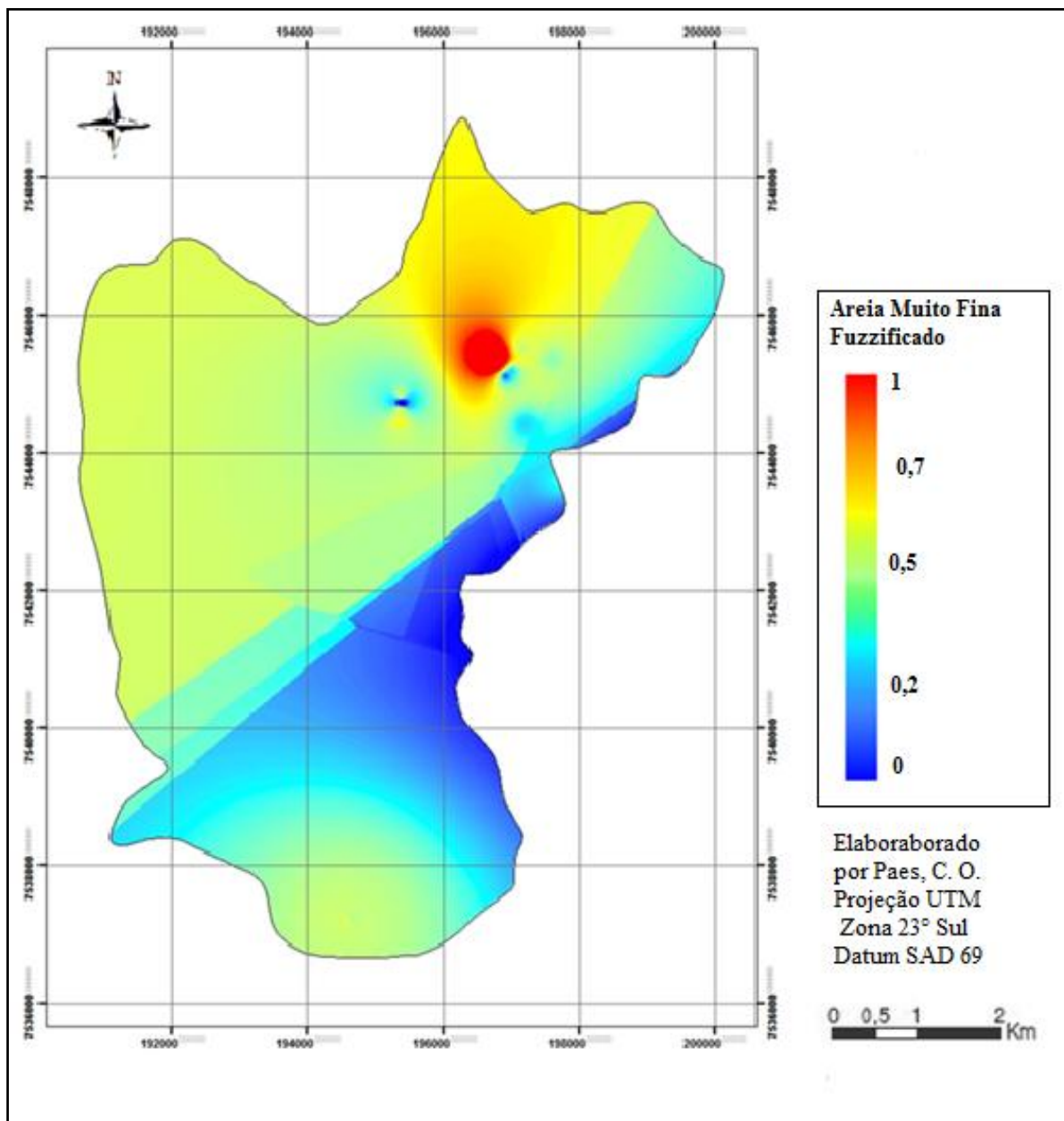


Figura 21. Mapa de fuzzificação para areia muito fina.

O mapa de fuzzificação para areia muito fina, mostra sua maior influência na parte sudeste da bacia. A areia muito fina foi reescalada entre 0 e 1, pois areia muito fina retém água por mais tempo, causando demora na recarga.

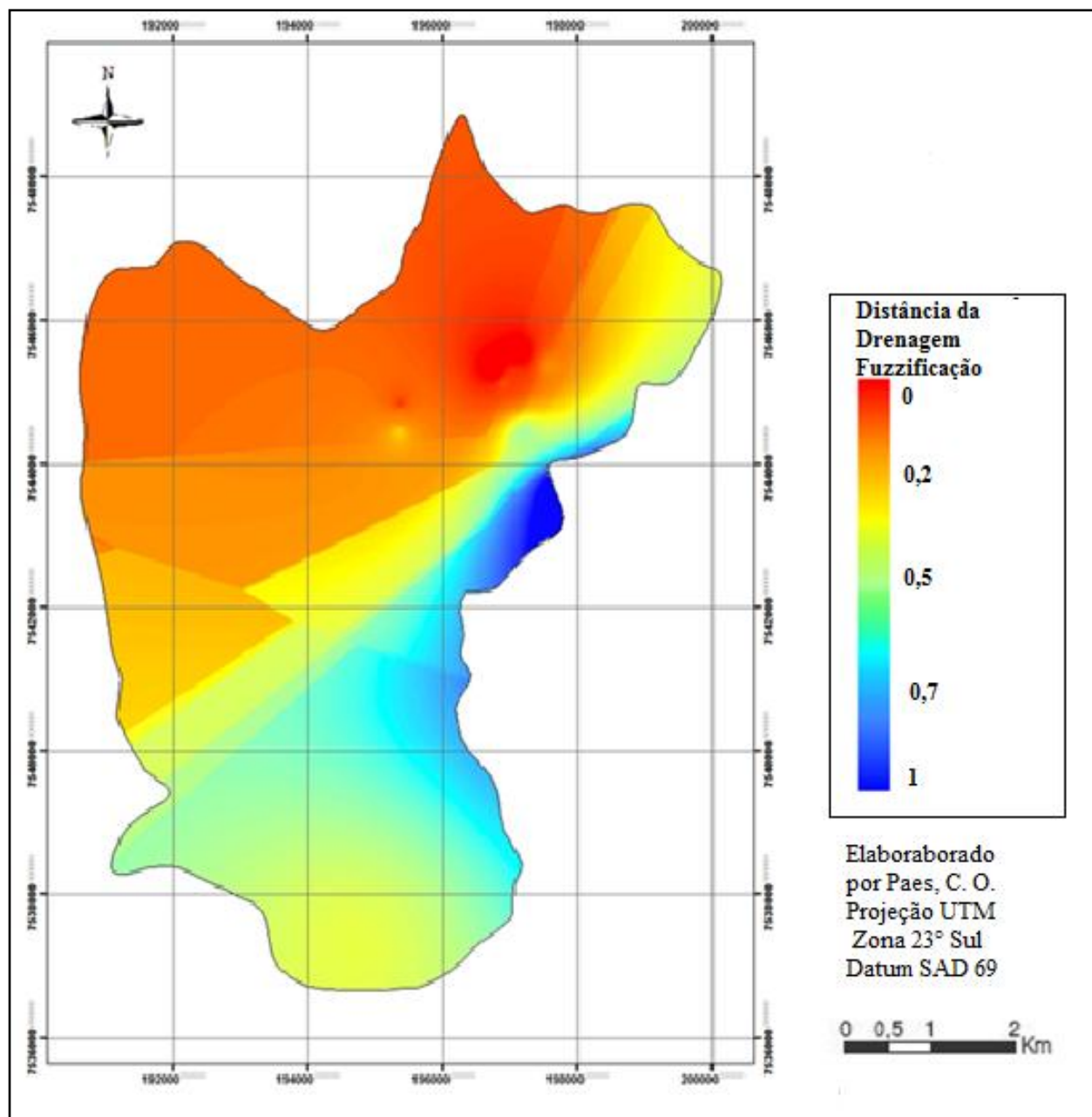


Figura 22. Mapa de fuzzificação para distância de drenagem.

O mapa da distância de drenagem, mostra que sua maior influência ocorre na noroeste da bacia. O mapa de Distância da Drenagem foi reescalado entre 1 e 0, pois quanto menor a distância do rio em relação ao poço, maior a influência na recarga.

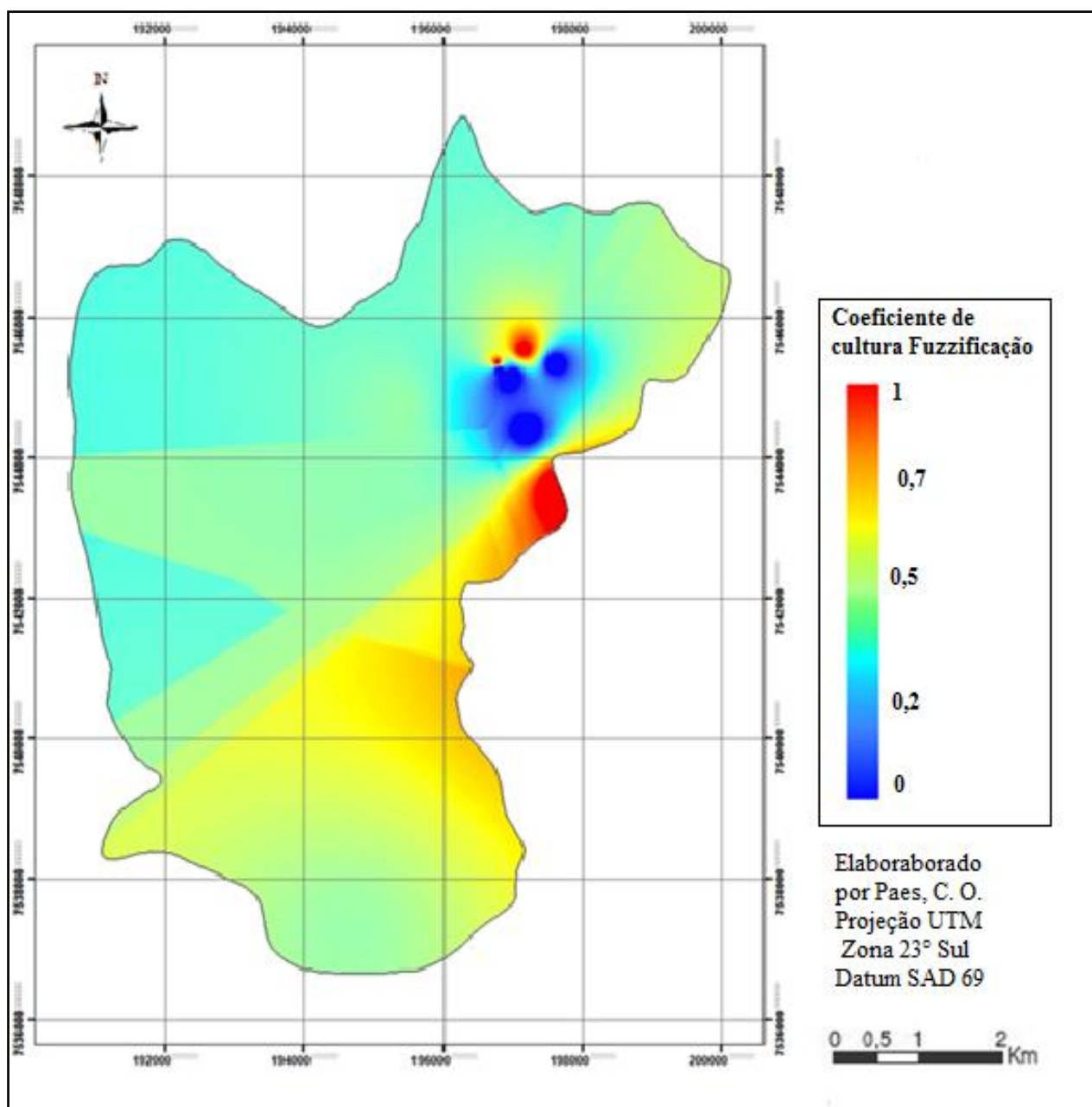


Figura 23. Mapa de fuzzificação para coeficiente de cultura (KC).

O mapa para o coeficiente de cultura mostra uma maior influência na parte central ao norte da bacia. O mapas de Coeficiente de cultura foi reescalado de 0 a 1, pois quanto maior a necessidade hidrica da planta, maior influência haverá no processo de recarga.

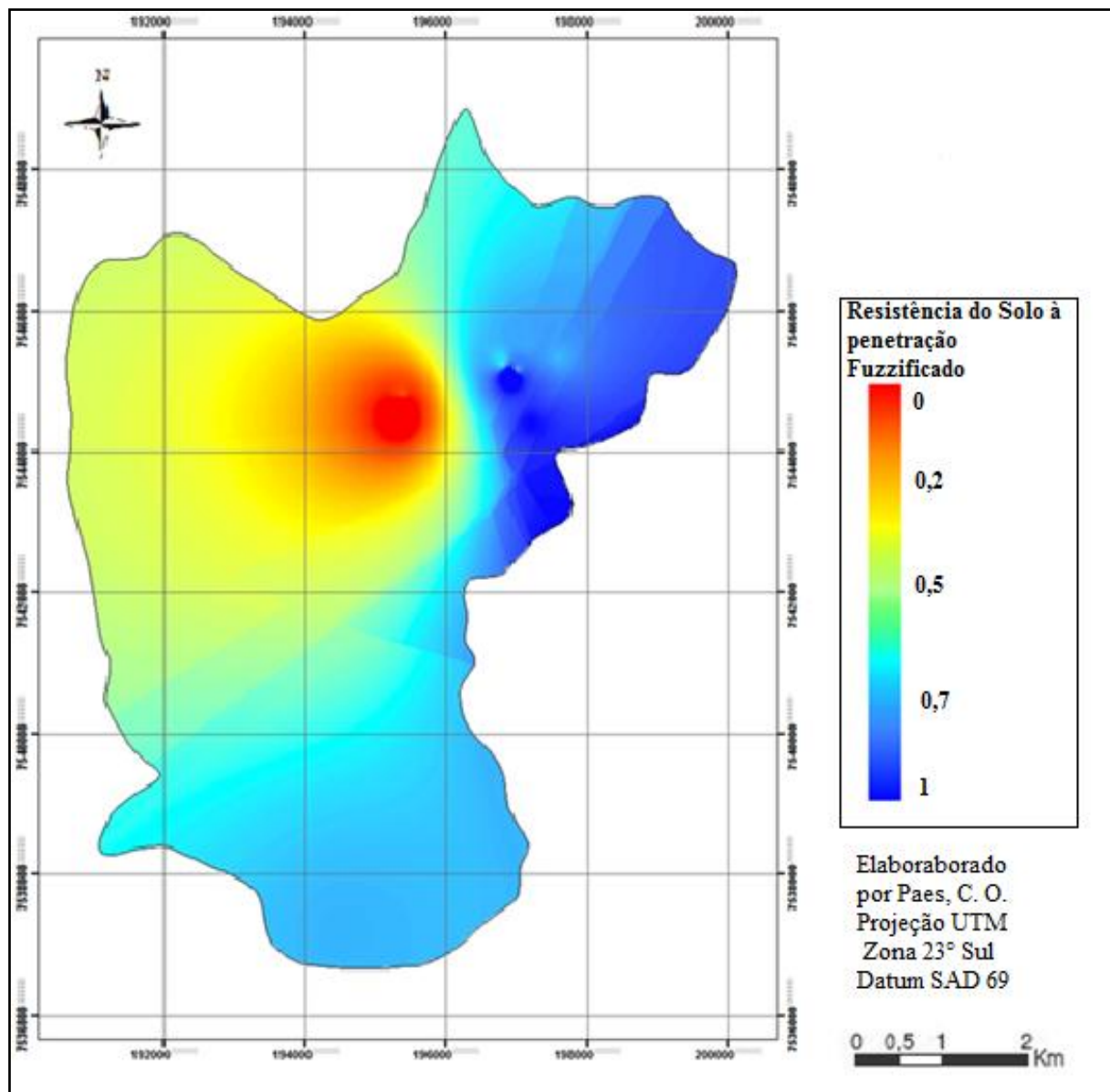
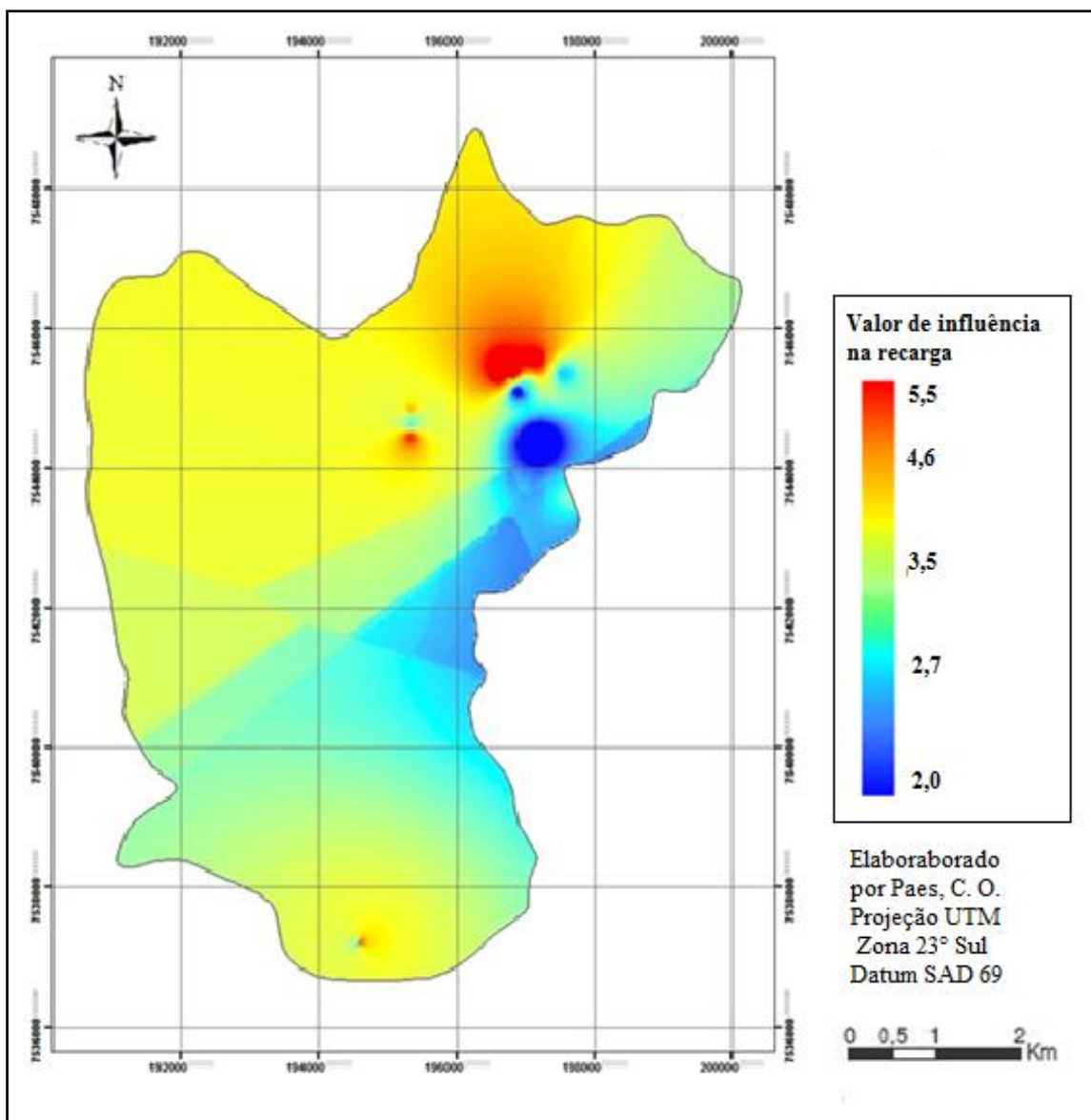


Figura 24. Mapa de fuzzição para resistência média do solo à compactação.

A resistência do solo a penetração mostra grande influência na região noroeste da bacia. O mapa de resistência foi reescalado entre 1 e 0, pois, áreas com alto grau de compactação criam um camada impermeabilizante no solo, dificultando a infiltração.

4.5 - 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 e 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 25)

Figura 25. Mapa síntese do valor de influência das variáveis em conjunto.

Podemos observar no mapa de soma das variáveis, no leste da bacia encontram-se a 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 26).

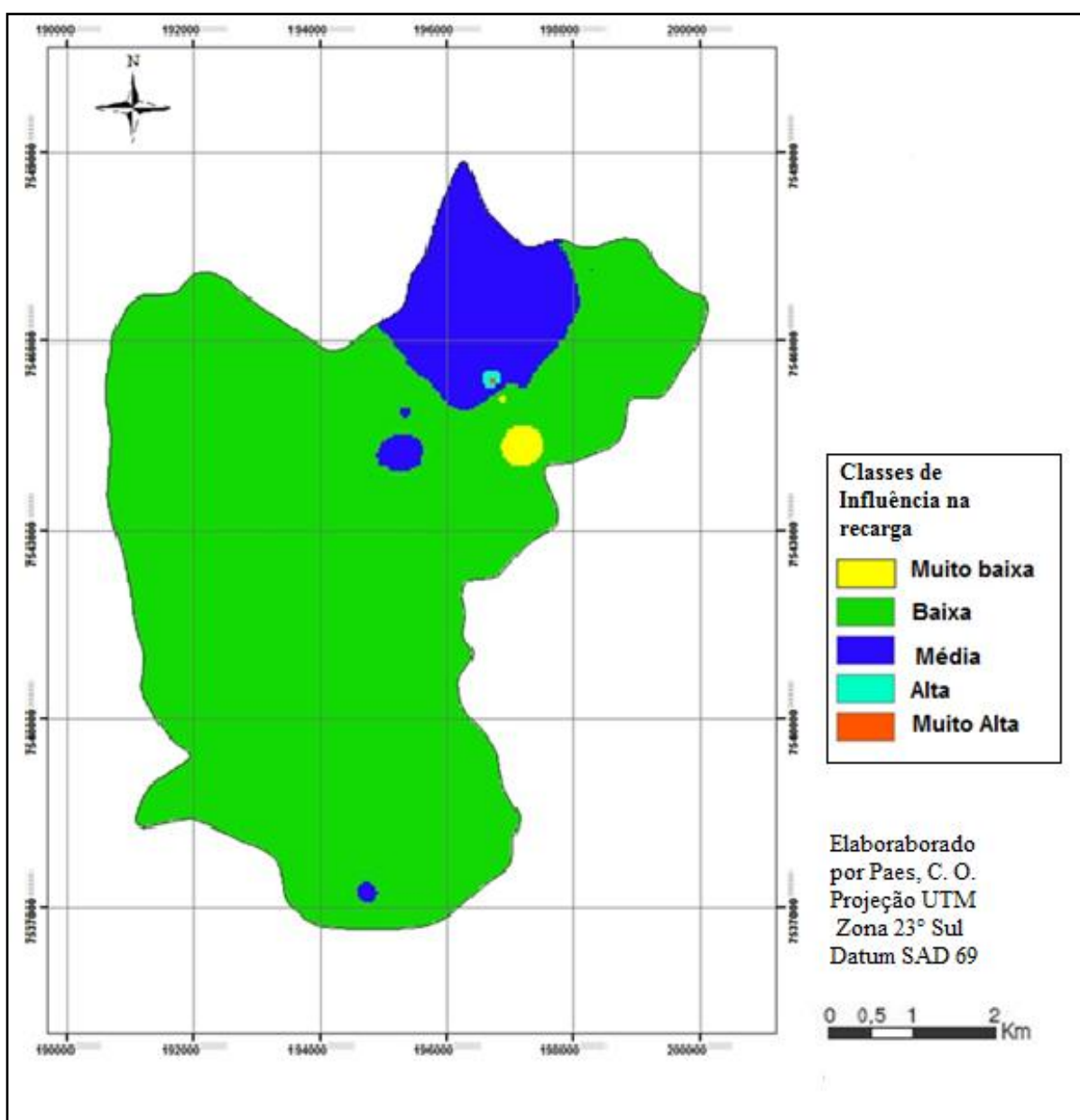


Figura 26. Mapa de classes de influência das condições de superfície na recarga do aquífero na Bacia do Ribeirão da Onça.

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, Dedeczek 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.

5. 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

6. 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.

ALLEY, W. M.; HEALY, R. W; LABAUGH, J. W; REILLY; T. E. Flow and Storage in Groundwater Systems. **Science's Compass**, New York, v. 296, p.1985-1990, 14 jun. 2002.

ALONSO, U. R. **Rebaixamento temporário de aquíferos**. São Paulo: Oficina de textos,. 151 p. 2007.

ANDRADE, A. R. S; GUERRINI, I. A; GARCIA, C. J. B. Variabilidade espacial da densidade do solo sob manejo da irrigação. **Ciências Agrotécnicas**, Lavras, v. 29, n. 2, p.322-329, mar/abr, 2001.

ARAÚJO, L. M., FRANÇA, A. B., POTTER, P. E. **Hydrogeology of the Mercosul aquifer system in the Paraná d Chaco - Paraná Basins, South America, and comparison with the Navajo Nugget aquifer system, USA**. Hydrogeology Journal, v. 7, p.317-336. 1999.

AZEVEDO, A.C.; DALMOLIN, R.S.D. **Solos e ambiente: uma introdução**. Santa Maria: Palotti, 100p. 2004.

BABALOLA, O. Spatial variability of soil water properties in tropical soils of Nigeria. **Soil Science**, Baltimore, v. 126, n. 5, p. 269-279, 1978.

BAILEY T. C.; GATRELL A. C. **Interactive spatial data analysis**. John Wiley & Sons Inc. Harlow Longman/New York. 1995.

BARRETO, C. E. A. G. **Balanço 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.

BARROS, G. C. As Águas Subterrâneas ou as Águas que Brotam das Pedras. **GTÁGUAS: Revista das Águas**. 4º ccr, nº 8. 2008. Disponível em: <<http://revistadasaguas.pgr.mpf.gov.br/edicoes-da-revista/edicao-8/materias/as-aguas-subterraneas-ou-as-aguas-que-brotam-das-pedras>>. Acesso em: 05 jan. 2011.

BERTOL, I.; BEUTLER, J.F.; LEITE, D.; BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agricola**, v.58, p.555-560, 2001.

BEYRUTH, Z. Aprendendo sobre qualidade de vida com as águas poluídas da Cidade de São Paulo. P.44 a 63. In: **Água. Revista USP 70**. 182p. 2006

BORGHETTI, N. R. B.; BORGHETTI, J. R.; ROSA FILHO, E. F. **Aquífero Guarani, a integração dos países do Mercosul**. Curitiba, 214 p., 2004.

BÖHLKE, J.K. Groundwater recharge and agricultural contamination. **Hydrogeology Journal**, Vol. 10, p. 153-179. 2002.

BRANDÃO, V. S.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. **Infiltração da água no solo**. Viçosa: Ed. UFV, 98 p. 2002.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil. (Caderno de Recursos Hídricos, 5)** Brasília: ANA, 2007.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. Brasília:** ANA, 2009.

BURROUGH, P.A.; BOUMA, J.; YATES, S.R. The state of the art in pedometrics. **Geoderma**, v.62, p.311-26, 1994.

BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment – Monograph on Soil and Resource.** Oxford: Claredon, 194p. 1989.

CABRAL, J.J.S.P; LAFAYETTE, K.P.V.; MONTENEGRO, S.M.G.L. Modelagem de Intrusão Marinha na Planície de Recife, Utilizando o Modelo Sharp. **V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, Vol. 2, pág. 745-753. Natal-RN, 2003.

CÂMARA, G.; SOUZA, R.C.M.; FREITAS U. M.; GARRIDO, J. C. P. Spring: Integrating Remote Sensing and GIS with Object-Oriented Data Modelling. **Computers and Graphics**, v. 15, n. 6, p.13-22, 1996.

CÂMARA, G.; MOREIRA, F. R.; BARBOSA, C.; ALMEIDA FILHO, R.; BONISCH, S. Técnicas de inferência geográfica. In: Câmara, G.; Davis, C.; Monteiro, A. M. V. **Introdução à Ciência da Geoinformação.** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002. p. 9.1-9.48. Disponível em:<[http://mtc-12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao .pdf](http://mtc-12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao.pdf)>. Acessado em: 15 abr. 2012.

CALIJURI, M.L., RÖHM, S.A. **Sistemas de informações geográficas.** Viçosa: CCET/DEC - Universidade Federal de Viçosa. Imprensa Universitária, 1994.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J. ; REICHERT, J. M. Desenvolvimento e funcionalidade de um penetrômetro de cone com taxa constante de penetração no solo. In:

REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DE ÁGUA, 15. 2004, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: SBCS, 2004. (CD-ROM).

CONICELLI, B. P. Gestão das águas subterrâneas transfronteiriças: o caso do Sistema Aquífero Guarani. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XVII. 2007, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABRH, 2007. Disponível em: <<http://www.hidro.ufcg.edu.br/twiki/pub/ASUB/Revis%3oBibliografica/187.pdf>>
Acessado em: 7 out. 2011.

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.

COSTA, S. G. F.; SILVA, R. M. **Potencial natural e antrópico de erosão na bacia experimental do Riacho Guaraíra.** Cadernos do Logepa, 7(1): 72-91, 2012.

CUNHA, J. P. A. R.; VIEIRA, L. B.; MAGALHÃES, A. C. Resistência mecânica do solo a penetração sob diferentes densidades de água. **Engenharia na Agricultura**, v.10, n.1-4, 7 p. Jan./Dez., 2002.

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.

DEUS, L. R.; TAVANTI; D. R; MOURA, S; AZEVEDO, F. Z; MEDVEDCHIKOFF, T. G; MOREIRA, A. A; REINALDO LORAND, R; CANÇADO, C. J.; MARTINS, M. M. R. Estudo da Vulnerabilidade de Contaminação de Aquífero por Agrotóxicos, na Região de Descalvado e Analândia (SP). **RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos / Associação Brasileira de Recursos Hídricos - Vol.14, n.1 , 2009.**

DUNNE, T.; LEOPOLD, L. B. **Water in environmental planning**. San Francisco: W.H. Freeman, 1978. 818p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1999.

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.

FORMAGGIO L. F. Estudo da Variabilidade da Piezometria dos Aquíferos Freáticos na Bacia do Alto Rio Jardim - Distrito Federal. **Dissertação de Mestrado**, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 112p. 2007.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais**. Banco Mundial: Washington, 2002. 104p.

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.

GOMIDE, F., GUDWIN, R. E TANSCHKEIT, R. **Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e aplicações.** Proc. 6th IFSA Congress-Tutorials. São Paulo. Brasil. p. 1-38, 1995

GONÇALVES, A. C.; GUIMARÃES, R. M.; BLAINSKI, E. ; TORMENA, C. A.; FOLEGATTI, M. V. Distribuição espacial de umidade do solo e da produtividade da cultura de feijão em um nitossolo. In: simpósio de geoestatística aplicada em ciências agrárias, 1. **Anais...** Botucatu, 2009.

GROHMANN, F. Distribuição e tamanho de poros em três tipos de solo do Estado de São Paulo. **Bragantia:** boletim técnico do Instituto agrônômico do Estado de São Paulo. v. 19, n. 21, 1960. p. 319-328

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.

HEUVELINK, G. B. M.; WEBSTER, R. Modelling soil variation: past, present, and future. **Geoderma**, v.100, p.269-301, 2001.

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **As águas subterrâneas do Estado de São Paulo.** São Paulo: Secretaria do Estado do Meio Ambiente- SMA, 2008. 103p.

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

JACOBI, P. **Água no mundo: verdades e mentiras**. Disponível em: <<http://www.geologo.com.br/encontrogeo12.asp?nome=pedrojacobi>> acesso em: agosto 2006.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**: relações solo planta. São Paulo: Ceres, 262p. 1979.

KURTENER, D, BADENKO, V. Questions of integration of some ecological models into geoinformation system. **In Proceedings of UDMS'99 on Information technology in the service of local government planing and management**. Venice, Italy, pages 21-23, 1999.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: Ed.UNESP, 226p.,1998.

LANDIM, P. M. B.; STURARO, J. R. **Krigagem indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos**. Rio Claro: Unesp, 2002. 19 p. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/DIDATICOS/LANDIM/indicativa.pdf>>. Acesso em: 29 ago. 2011.

LEE, C. C. **Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controllers—parts I and II**, IEEE Trans. Syst. Man. Cybernet. 20:404-435. 1990.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, v.1.1985, p.277-294.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP,. 335 p. 2005

LIMA, C. L. R.; SILVA, A. P.; IMHOFF, LEÃO, T. P. Carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 217-223, 2006.

LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S.; SILVA, S. A. Dependência espacial de atributos do solo em área de vegetação em regeneração natural. In: SIMPÓSIO DE GEOESTATÍSTICA APLICADA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS, 1. **Anais...** Botucatu, , 4 p. 2009

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

MACHADO, P. L. O. A. **Compactação do solo e crescimento de plantas: como identificar, evitar e remediar.** Rio de Janeiro. Embrapa Solos, 18 p. 2003.

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. KNOTTERS, M.; HEUVELINK, G. B. M. Incorporation of ancillary information derived from satellite images applied on environmental variables evaluation. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3437-3444. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr%4080/2006/11.14.22.15/doc/3437-3444.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2010.

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

MENDEL, J. M. **Fuzzy logic systems for engineering:** a tutorial, IEEE, 1995.

McBRATNEY, A. B., MENDONÇA-SANTOS, M. L., MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v.117, p.3-52, 2003.

MENDONÇA, L. A. R.; VÁSQUEZ, M. A. N.; FEITOSA, J. V.; OLIVEIRA, J. F. ; FRANCA, R. M. ; VÁSQUEZ, E. M. F.; FRISCHKORN, H. Avaliação da capacidade de

infiltração de solos submetidos a diferentes tipos de manejo. **Revista: Eng. Sanit. Ambient**, Vol..14, n.1, p. 89-98, jan/mar 2009.

MEZA, A. L.; BIONDI NETO, L.; SOARES DE MELLO, J.C.C.B.; GOMES, E.G.; COELHO, P.H.G. FSDA – Free Software for Decision Analysis (SLAD – Software Livre de Apoio à Decisão): A Software Package for Data Envelopment Analysis Models. **In: Anais del XII Congreso Latino Iberoamericano de Investigación Operativa - CLAIO**, 2004.

McBRATNEY, A.B., HART, G.A., McGARRY, D. The use of region partitioning to improve the representation of geostatistically mapped soil attributes. **J. Soil Sci.**, v. 42, p. 513-532, 1991.

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

MELLO, J. M.; BATISTA, J. L. F.; RIBEIRO Junior, P. J. ; OLIVEIRA, M. S. Ajuste e seleção de modelos espaciais de semivariograma visando à estimativa volumétrica de *Eucalyptus Grandis*. **Scientia Forestalis**, v. 69, p.25-37, 2005.

MESQUITA, M.G.B.F.; MORAES, S.O. & CORRENTE, J.E. Caracterização estatística de variáveis físicas do solo. **Acta**. 25:35-44, 2003.

MMA Plano Nacional de Recursos Hídricos – Ministério do Meio Ambiente– Secretaria de Recursos Hídricos – SRH/2004 Brasília-DF. Disponível em: <www.mma.gov.br> acesso em: junho 2013.

MORIN, J.; VAN WINKEL, J. The effect of raindrop impact and sheet erosion on infiltration rate and crust formation. **Soil Science Society of America Journal**, v.60, p.1223-1227, 1996.

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

ODEH, I.O.A., MCBRATNEY, A.B., CHITTLEBOROUGH, D.J. Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model. **Geoderma**, v.63, p.197–214, 1994.

ODEH, I.O.A., MCBRATNEY, A.B., CHITTLEBOROUGH, D.J. Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: heterotopic cokriging and regression-kriging. **Geoderma**, v.67, p.215– 225, 1995.

OLIVEIRA, J. B. **Solos do estado de São Paulo: descrição das classes registradas no mapas pedológico**. Campinas, Instituto Agrônômico, 108 p., 1999.

OLIVER, M. A. **Geostatistical applications for precision agriculture**. Nova York: Springer. 331 p., 2010.

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.

PARALTA, E. A; FRANCÉS, A. P; RIBEIRO, L. F. **Modelação da recarga do aquífero livre miocénico da bacia de Alvalade e implicações ao nível da contaminação agrícola (um caso de estudo na infra-estrutura 12 – bloco de rega de canhestros/ferreira do Alentejo)**. IN : Seminário sobre águas subterrâneas, LNEC. Anais... Março de 2007. 12 p. 2007.

PERUSI, M. C. **Alterações antrópicas de argissolos decorrentes do uso e manejo e reflexos na densidade demográfica do município de Anhumas-SP**. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

PERUSI, M. C.; CARVALHO, W. A. Estrutura agrícola e os deslocamentos populacionais no município de Anhumas-SP. **Energia na Agricultura. Botucatu**, v. 17, n. 2, p. 18-32, 2002.

POMPÊO, C. A. Balanço Hidrico da Zona Não- Saturada do Solo na Bacia do Ribeirão do Onça (SP). **Tese de Doutorado**. São Carlos, SHS-EESC-USP. 1990.

PRADO, R. de M.; ROQUE, C. G.; SOUZA, Z. M. de. Sistemas de preparo e resistência à penetração e densidade de um Latossolo Vermelho eutrófico em cultivo intensivo e posio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 37, n. 12, p. 1795-1801, dez. 2002.

PRADO, H.; JUNIOR, A. L. P.; GARCIA, J. C.; MORAES, J. F. L. DE; CARVALHO, J. P. DE; DONZELI, P. L. **Solos e ambientes de produção**. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. DE; LANDELL, M. G. DE A. (ed.). Cana-de-açúcar. Campinas: Instituto Agronômico, p.179-204. 2010.

PRAUN JÚNIOR, A. Porposta do corredor ecológico para as Áreas de Recarga do Aquífero Guarani em Santa Catarina - Brasil . **Dissertação de Mestrado**. UFSC, Florianópolis, 126p. 2007.

PEBESMA, E. J. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. **Computers & Geosciences**, v. 30, p. 683–691, 2004.

REICHARDT, R; TIMM, L. C. **Solo, Planta, Atmosfera: conceitos processos e aplicações**. Ed. Manole, p. 478. 2004.

SALES, L. E. O.; FERREIRA, M. M.; SILVA, M. O; CURI, N. Estimativa da taxa de infiltração básica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 34 (11), pp. 2091-2095. 1999.

SILVA, B. C.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, v.34, n.2, p. 399-406, mar/abr 2004.

SILVA, R. B. G. **Águas subterrâneas: um valioso recurso que requer proteção**. São Paulo, DAEE, 2007.

SILVA A. S; LIMA J. S. S; XAVIER A. C; TEIXEIRA M. M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo vermelhoamarelo húmico cultivado com café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34:15-22. 2010.

SOARES, P. V.; PEREIRA, S. Y. ; SIMÕES, S. J. C.; BERNADES, G. P.; BARBOSA, S. A. Mapa de infiltração do alto e médio Vale do Paraíba do Sul com base em elementos do meio físico e na precipitação. **Revista Ambiente e Água**. Vol. 3 nº 1, p. 26 – 42, Abril/2008.

SOARES FILHO, R. Identificação e avaliação dos sistemas motomecanizados de preparo periódico do solo, usados no município de Rio Verde-GO. Viçosa: UFV, 1992. 64p. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1992.

SOLDERA, B. C., MANZIONE, R. L., PRANDI, E. C., ALEXANDRELLI, P. C. Monitoramento de níveis freáticos do Sistema Aquífero Bauru (SAB) na formação Adamantina em Assis/SP In: II Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo, 2, 2011, São Paulo. **Anais do II Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo**. São Paulo: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2011.

SOLDERA, B. C., MAZIONE, R. L. **Modelagens de 'series de monitoramento de nível freático em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG), sob influência de diferentes usos agrícolas da terra**. Dissertação de mestrado. FCA- UNESP. Botucatu. 110 pq. 2013.

SOUZA, M. A. S.; CUNHA, D. G.; NUNES, M. C. P.; TEIXEIRA, I.; BORGES, E. N. Avaliação da variabilidade espacial do atributo físico resistência a penetração em diferentes regiões do cafeeiro e sistema de manejo empregado em solo de cerrado de Minas

Gerais. In: **VII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e IV Encontro Americano de Pós-Graduação** – Universidade do Vale do Paraíba. 1505 – 1508. 2004.

SOUZA, E. D.; CARNEIRO, M. A. C.; PAULINO, H. B. Atributos físicos de um Neossolo Quartzarênico e um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, n.11, p.1135-1139, 2005.

SOUZA, Z. M.; CAMPOS, M. C. C.; CAVALCANTE, I. H. L.; MARQUES JUNIOR, J. CESARIM, L. G.; SOUZA, S. R. Dependência espacial da resistência do solo a penetração e do teor de água do solo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Revista Ciência Rural**, v.36, n.1, p.128-134, jan-fev/ 2006.

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.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. C.; GUIMARÃES, M. F.; FONSECA, I. C. B. Resistência do solo a penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 25 p.725-730, 2001.

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

TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. C. S.; GONÇALVES, C. A. Densidade, porosidade e resistência a penetração em latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, v.59, n.4, p.795-801, out./dez. 2002.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2 ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos / Editora da UFRGS, 2005. 678p.

VALERIANO, M.M.; EPIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R. ;OLIVEIRA, J.B. Bi-directional reflectance factor of 14 soil classes from Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v.16, p. 113-128, 1998.

VEIGA, L. S. O. **Utilização de lógica nebulosa para a construção de um modelo fuzzy Takagi-Sugeno do conversor DC-CD Buck**. Belo Horizonte: Programa de iniciação científica em Engenharia de Controle Automação, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005. (Relatório)

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.